



Distr.
LIMITADA

LC/MEX/L.788/Rev.1
11 de septiembre de 2007

ORIGINAL: ESPAÑOL

EVALUACIÓN DE EXTERNALIDADES AMBIENTALES DEL SECTOR ENERGÍA EN LAS ZONAS CRÍTICAS DE TULA Y SALAMANCA

Este documento fue realizado en el marco de un Convenio de Colaboración entre la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) de la Organización de Naciones Unidas (ONU). Participaron la Dirección General de Energía y Actividades Extractivas de la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de la SEMARNAT y la Unidad de Energía y Recursos Naturales de la Sede Subregional de la CEPAL en México. Las opiniones expresadas en este documento son de la exclusiva responsabilidad de los especialistas que participaron en su elaboración y pueden no coincidir con las de la Organización.

ÍNDICE

	<u>Página</u>
RESUMEN	1
PRESENTACIÓN.....	5
I. ASPECTOS METODOLÓGICOS	7
A. METODOLOGÍA DE VÍAS DE IMPACTO	8
1. Caracterización de las fuentes emisoras	9
2. Dispersión de contaminantes atmosféricos.....	10
3. Evaluación de impactos	13
4. Evaluación monetaria	16
B. NUEVO PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LAS EXTERNALIDADES	18
C. INCERTIDUMBRE	19
II. INFORMACIÓN PARA LOS MODELOS UTILIZADOS	21
A. INSTALACIONES DEL SECTOR ENERGÍA.....	21
1. Selección de las fuentes fijas de emisión.....	21
2. Datos técnicos de las fuentes seleccionadas	23
3. Dominio local de modelación	25
4. Dominio regional de modelación.....	27
B. DATOS METEOROLÓGICOS	28
1. Datos meteorológicos para la dispersión local	28
2. Datos para dispersión regional.....	29
C. INVENTARIO DE EMISIONES DE MÉXICO.....	31
D. FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA CONSIDERADAS	32
1. Tasas de incremento de riesgo relativo.....	33
2. Tasas de incidencia y de mortalidad	33
3. Funciones exposición-respuesta para mortalidad estimadas con el enfoque de pérdida de expectativa de vida	34

	<u>Página</u>
4. Resumen de funciones exposición-respuesta aplicadas en el estudio	36
E. COSTOS ECONÓMICOS	37
1. Morbilidad	37
2. Mortalidad.....	38
3. Otros impactos	40
III. RESULTADOS	42
A. DISPERSIÓN Y CONCENTRACIÓN DE LOS CONTAMINANTES.....	42
1. Calidad del aire en el dominio local	42
2. Calidad del aire en el dominio regional	47
3. Deposición	51
B. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS EXTERNALIDADES	52
C. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	56
IV. CONCLUSIONES	58
ACRÓNIMOS	61
BIBLIOGRAFÍA	63

RESUMEN

El propósito de este trabajo es estimar las externalidades del sector energía con base en la concentración estimada de los contaminantes, en dos zonas de la República Mexicana consideradas críticas desde el punto de vista ambiental: Tula, en el estado de Hidalgo, y Salamanca, en el estado de Guanajuato. En ambas zonas se cuenta con una central termoeléctrica y una refinería de petróleo.

A fin de evaluar dichas externalidades, se utilizó la Metodología de Vías de Impacto, pero con programas computacionales diferentes respecto de estudios previos. Estos modelos brindan una mayor capacidad de simulación, así como una mejorada flexibilidad en las opciones ofrecidas. Las principales mejoras fueron las siguientes: 1) uso del sistema de modelos AERMOD de la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos, para simular la dispersión local; 2) uso del modelo Windrose Model Interpreter (WMI) para la modelación del dominio regional; 3) utilización de una base de datos de la CEPAL con información regional de meteorología y de contaminantes, que cubre la zona de México, Centroamérica y el Caribe; 4) un conjunto actualizado de funciones exposición-respuesta para estimar los impactos en la salud humana; 5) la aplicación de la metodología de pérdida de expectativa de vida en México para evaluar el impacto de la mortalidad y para su valoración económica, y 6) uso de un nuevo programa computacional que implementa las mejoras mencionadas.

La aplicación de la metodología seleccionada requirió disponer de una serie de datos técnicos, económicos y de salud, por lo que fue necesario adoptar el año 2004, sobre el cual existía dicha información. Se obtuvo información geográfica y meteorológica de las dos zonas críticas estudiadas, así como de las características técnicas de las plantas termoeléctricas y las refinerías, incluyendo el inventario de los contaminantes emitidos. El análisis se limitó a considerar las emisiones de partículas de bióxido de azufre (SO_2) y de óxido de nitrógeno (NO_x), sin abarcar las emisiones “corriente arriba”. Se incluyó una estimación del costo asociado a la emisión de gases de efecto invernadero.

Para estimar el impacto en la salud se utilizaron dos meta-análisis y un estudio independiente. El primero de ellos es el meta-análisis realizado en el marco del proyecto Ecosistema Urbano y Salud de los Habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México. El segundo meta-análisis, elaborado por Stieb y otros (2002), se utilizó en la obtención del IRR para evaluar la mortalidad aguda por SO_2 . Para el caso de las admisiones hospitalarias por SO_2 , se ocupó un estudio independiente (Spix y otros, 1998), al no contar con un meta-análisis. En el marco de este estudio se aplicó por primera vez en México la metodología propuesta por Leskell y Rabl en Europa para la estimación de las pendientes exposición-respuesta asociadas a la mortalidad en Años de Vida Perdidos (AVP).

Se actualizó también la información sobre costos de morbilidad y mortalidad. El costo directo de enfermedad utilizado corresponde al nivel III de atención (el más completo) del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), estimado por el Instituto Nacional de Ecología y el

Instituto Nacional de Salud Pública. La pérdida de productividad se calculó considerando la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares y el salario mínimo general promedio nacional para 2004. Finalmente, al no contar con estimados de Voluntad a Pagar para efectos de morbilidad, se transfirieron los valores de ExternE (2005) ajustando por relación de ingresos entre México y la Unión Europea.

Para valorar la mortalidad se utilizó el Valor Estadístico de la Vida (VEV) estimado para México por Hammit e Ibarrarán, en un documento publicado en agosto de 2006, y con dicho valor se determinó el Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP) con la metodología propuesta por Spadaro.

La concentración estimada para SO_2 en el dominio local excede el valor establecido por la norma de calidad del aire en un número alto de receptores en ambas zonas. Por su parte, las concentraciones promedio estimadas para PM_{10} y NO_x en el dominio local se ubican, en lo general, dentro de la norma de salud de referencia.

Las externalidades ambientales del sector energía, para el año 2004, se estimaron en 868 y 204 millones de dólares en las zonas de Tula y Salamanca, respectivamente. Estos costos incluyen únicamente el efecto de las emisiones en la salud humana sin considerar su impacto en materiales, cultivos, ecosistemas, o en el calentamiento global. Si se considera el impacto por cambio climático, las externalidades ambientales se incrementan en 266 millones de dólares, considerando el estimado medio de costos de mitigación en México, de 18 dólares por tonelada de dióxido de carbono (CO_2).

El contaminante de mayor impacto es el SO_2 ; su aporte, como contaminante primario y secundario en forma de sulfatos, constituye 87% de los costos externos en Tula y 76% en Salamanca. El impacto regional (más allá de los 50 km) es mayor, pues los contaminantes son transportados a grandes distancias y afectan la salud de un número elevado de personas en una amplia área de influencia.

Considerando el costo externo de cada refinería, de 418,6 y 114,4 millones de dólares, respectivamente, se obtiene una externalidad de 3,93 dólares por barril de petróleo crudo procesado para Tula y de 1,58 dólares para Salamanca. Como referencia, si se considera un precio internacional de 33 dólares por barril de petróleo crudo, la externalidad representaría 11,9% y 4,8%, respectivamente, para Tula y Salamanca.

Para la generación de electricidad en las dos zonas, durante 2004 se estimó un costo externo de 402,5 millones y 85,9 millones de dólares para Tula y Salamanca, respectivamente. La externalidad es de 3,63 y 2,70 centavos de dólar por kWh generado, para Tula y Salamanca; si se considera un valor de referencia de 5,8 centavos de dólar por kWh, como costo de producción en las centrales termoeléctricas de vapor, los costos externos representarían 62,6% y 46,6% del costo de generación. Estos resultados son consistentes con la estimación de externalidades de la generación de electricidad en el principal estudio de referencia de Europa, el proyecto ExternE.

La estimación de los costos externos conlleva un nivel de incertidumbre alto, a causa de la cantidad de variables involucradas y a los diferentes supuestos, particularmente con respecto a los efectos de los contaminantes en la salud y a los costos para la valoración. Los resultados deben

interpretarse tomando en cuenta el rango de incertidumbre de la metodología, lo que implica que el valor real podría ser menor o mayor que el estimado. A pesar de las incertidumbres asociadas en la valoración de externalidades, el presente estudio ratifica que los beneficios ambientales que se obtendrían de la reducción de emisiones son contundentes.

PRESENTACIÓN

La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), de México, identifica la “valoración de los recursos naturales” como uno de los pilares de la política ambiental y establece entre sus objetivos estratégicos el detener su avance e invertir el sentido tanto de la contaminación como de la degradación de los recursos. La valoración de las externalidades ambientales de la producción de energía es necesaria para formular y aplicar la política ambiental y alcanzar dichos objetivos. Las externalidades negativas representan costos y beneficios no incorporados a los precios de mercado que distorsionan las decisiones económicas.

La producción y el consumo de energía conllevan impactos locales, regionales y globales sobre el medio ambiente; sus emisiones constituyen la principal fuente de contaminación del aire en el país y de emisión de gases de efecto invernadero. La regulación de sus efectos se basa en la definición de niveles máximos permisibles de emisión, que consideren los costos ambientales y fomenten la aplicación de tecnologías que reduzcan las emisiones. La elaboración y revisión de normas oficiales mexicanas (NOM) para regular los procesos del sector energía requiere, por lo tanto, evaluar la calidad del aire en las zonas aledañas a sus instalaciones, así como valorar los costos externos de la contaminación.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar las externalidades del sector energía con base en la concentración estimada de los contaminantes que se emiten en dos zonas críticas: Tula, en el estado de Hidalgo y Salamanca, en el estado de Guanajuato. En ambas zonas se cuenta con una planta de refinación de petróleo y otra de generación de electricidad. El conocimiento de los costos externos de sus impactos dará bases a la secretaría para formular un conjunto de disposiciones que coadyuven a su mitigación.

El informe comprende cuatro capítulos. En el primero se expone la metodología aplicada para evaluar las externalidades ambientales en cada uno de los dos sitios. En el segundo se analiza la información utilizada, correspondiente al año 2004, de carácter técnico, ambiental y económico, así como de salud. En el capítulo III se presentan los resultados de los niveles de concentración de contaminantes, tanto en el dominio local como regional, sus efectos en la salud, y la estimación del costo de los daños, denominados costos externos o externalidades. Las conclusiones se exponen en el capítulo IV.

El estudio se complementa con el que se publicó en 2004, con el título “Evaluación de externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México”, en el cual se evaluaron las externalidades de las mayores plantas termoeléctricas del país, empleando metodologías simplificadas propuestas por el Organismo Internacional de Energía Atómica. Entre las conclusiones de dicho estudio se planteó la necesidad de abarcar las emisiones de otras grandes instalaciones, en particular las refinerías de petróleo, a fin de estimar los niveles de contaminación en las zonas críticas.

En el presente estudio se implementaron modelos detallados para simular la dispersión de contaminantes a nivel local y regional. Su aplicación en el país, por primera vez en América Latina, fue posible gracias al esfuerzo de expertos internacionales, coordinados por la CEPAL, para actualizar las bases de datos necesarias y para realizar las adecuaciones a México de los programas de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y de la Unión Europea.

Su elaboración estuvo a cargo de un grupo interdisciplinario constituido por funcionarios de la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de la SEMARNAT y de la Sede Subregional de la CEPAL en México. Por lo que se refiere a la Subsecretaría, los integrantes fueron Ramón Carlos Torres, Director General de Energía y Actividades Extractivas; Carlos García-Moreno, Director de Emisiones a la Atmósfera, y Claudia Octaviano, Subdirectora de Refinación y Electricidad. Por parte de la CEPAL participaron Fernando Cuevas, Jefe de la Unidad de Energía y Recursos Naturales; Manuel Eugenio Rojas, Asistente de Investigación, así como las consultoras Leonor Turtos, Madeleine Sánchez y Elieza Meneses. Juan Carlos Moreno-Brid, Coordinador de Investigación de la CEPAL, revisó el informe y aportó comentarios importantes.

La realización de este estudio requirió de un esfuerzo conjunto de varias instituciones que aportaron valiosa información, conceptos, recomendaciones y sugerencias. Se extiende un reconocimiento por sus valiosas contribuciones a la Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico de la Secretaría de Energía, a la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios de la Secretaría de Salud, a la Dirección de Operación de la Comisión Federal de Electricidad y a PEMEX Refinación; al Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua por sus recomendaciones para el uso de la información meteorológica; y a las áreas de SEMARNAT que colaboraron en su realización: Dirección General de Estadística e Información Ambiental, Gestión de la Calidad del Aire y RETC e Investigación de la Contaminación Urbana y Regional, esta última adscrita al Instituto Nacional de Ecología.

Las opiniones contenidas en el estudio son de la responsabilidad de los especialistas que participaron en su elaboración y pueden no coincidir con las de las instituciones involucradas.

Jorge Máttar
Oficial a cargo de la Sede Subregional de la
CEPAL en México
NACIONES UNIDAS

Ing. Sandra Denisse Herrera Flores
Subsecretaria de Fomento y Normatividad
Ambiental
SEMARNAT

I. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Las externalidades representan costos y beneficios no incorporados a los precios de mercado, y que por tanto distorsionan las decisiones económicas óptimas. En el sector energético, la actividad de refinación de petróleo, así como la producción de electricidad con base en combustibles fósiles, generan diferentes impactos. Entre éstos se puede mencionar, a nivel local, la contaminación de áreas urbano-industriales; a nivel regional, la lluvia o deposición ácida, y a nivel global, el cambio climático. El valor de estos efectos de la actividad energética no se incorpora al precio del bien producido.

La valoración de las externalidades se realiza mediante diferentes metodologías, incluso algunas que aplican sólo un tratamiento cualitativo. La metodología más aceptada es la de “Vías de Impacto”, utilizada por la Unión Europea en su proyecto ExternE. Se han desarrollado diferentes modelos computacionales para su aplicación, algunos muy detallados con altos requerimientos de información, otros más simplificados que emplean menos información y recurren a una serie de aproximaciones para las diversas estimaciones. Entre estos últimos se cuenta el modelo SIMPACTS ¹ del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Dicho modelo simplificado se utilizó en el estudio previo ya mencionado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de México y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). ² En dicho documento se expone de manera detallada la Metodología de Vías de Impacto, así como los supuestos y aproximaciones que utiliza el modelo SIMPACTS para obtener una evaluación de externalidades.

En el presente trabajo se emplearon modelos más detallados para el análisis de la dispersión de contaminantes con el fin de evaluar su concentración en la zona de influencia y se utilizó información real sobre la distribución de la población en el dominio regional.

La selección de un modelo simplificado o de modelos más detallados depende del alcance del estudio que se pretende realizar. La primera evaluación de externalidades mencionada anteriormente se realizó con el modelo simplificado, considerando un número amplio de fuentes y zonas de estudio. Derivado de esos análisis, se decidió aplicar en el presente caso modelos detallados de dispersión en dos zonas críticas.

¹ OIEA, 2003, SIMPACTS.

² Disponible en la página web de la SEMARNAT (www.semarnat.gob.mx).

A. METODOLOGÍA DE VÍAS DE IMPACTO

En el presente estudio se utilizó también la Metodología de Vías de Impacto que comprende las cuatro etapas (véase el gráfico 1) que se exponen a continuación.

1) Caracterización de la fuente emisora: localización, datos de la chimenea, y flujos de contaminantes emitidos, entre otros.


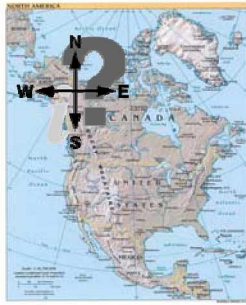
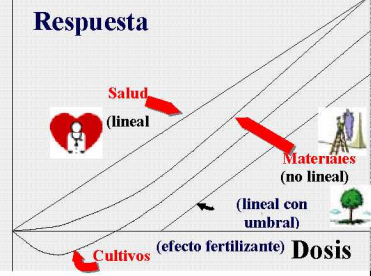

2) Dispersión: cálculo del incremento de las concentraciones de los contaminantes emitidos en las regiones afectadas (dominio local y regional), utilizando modelos de dispersión atmosférica.

3) Evaluación de impactos: selección de las funciones exposición-respuesta, las cuales relacionan un impacto físico observado o síntoma en la salud con una exposición dada a un contaminante.

4) Costos: evaluación monetaria de los impactos en la salud, tanto de morbilidad como de mortalidad.

Gráfico 1

ETAPAS DE LA METODOLOGÍA VÍAS DE IMPACTO

1. Caracterización de la fuente	2. Dispersión de contaminantes	3. Evaluación de impactos	4. Valoración económica
 <ul style="list-style-type: none"> -Localización -Tipo de chimenea -Parámetros de emisión 	 <ul style="list-style-type: none"> -Meteorología -Modelos de dispersión 	 <ul style="list-style-type: none"> -Elección de las funciones exposición-respuesta 	 <ul style="list-style-type: none"> -Métodos de valoración -Costo de los daños

Fuente: Elaboración propia.

Se utilizaron modelos computacionales diferentes al estudio anteriormente mencionado. Los cambios pueden resumirse de la siguiente forma.

1) La dispersión local se resuelve con el sistema de modelos AERMOD, en lugar del modelo ISCLT2, ambos de la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos. El

primero tiene en cuenta la topografía del terreno, el uso de los suelos, la deposición seca y húmeda de los contaminantes, entre otros aspectos importantes.

2) Para la dispersión regional se emplea el modelo Windrose Model Interpreter (WMI), en sustitución del enfoque simplificado considerado en el UWM (Uniform World Model) que utiliza el modelo SIMPACTS del OIEA. Se dispuso de una base de datos con información regional, recientemente integrada por la CEPAL, la cual cubre México, Centroamérica y el Caribe.

3) Se seleccionó un conjunto actualizado de funciones exposición-respuesta para estimar los impactos en la salud humana.

4) Se utilizó un nuevo programa computacional llamado: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de Instalaciones Energéticas (SEIA), el cual permite integrar los resultados de los modelos de dispersión AERMOD y el WTM con la información georreferenciada de población y salud en México para aplicar la ecuación de función del daño y la valoración de externalidades.

El programa ³ y la base de datos mencionados fueron desarrollados por especialistas de Cuba Energía dentro de un proyecto de investigación entre el Instituto Nacional de Ecología (INE) de la SEMARNAT, ⁴ Cuba Energía y la Sede Subregional de la CEPAL en México.

A continuación se describe cada una de las etapas de la metodología utilizada.

1. Caracterización de las fuentes emisoras

El primer paso consiste en obtener los datos técnicos de las fuentes de emisión, tanto de la refinería como de la central de generación eléctrica, incluyendo sus coordenadas geográficas, características físicas y un inventario detallado de los contaminantes emitidos. En el caso de la refinería existen numerosos puntos de emisión (calderas, quemadores elevados, quemadores de fosa, entre otros), mientras que en la central termoeléctrica funcionan calderas y turbinas de combustión.

³ El programa se encuentra en fase de desarrollo, en particular la interfase con el usuario, el tratamiento de errores, la ayuda en línea, entre otros. Será puesto a disposición de los países de la región por la CEPAL cuando esté concluido.

⁴ Por el INE participó la Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional.

2. Dispersión de contaminantes atmosféricos

a) Dispersión local

Para analizar la dispersión local de contaminantes se implementó el Sistema AERMOD de la EPA, que cuenta con tres componentes: el AERMAP, el AERMET y el AERMOD. Se usaron los programas de la EPA,⁵ haciendo las adecuaciones pertinentes para las condiciones de México y desarrollando algunas herramientas de cálculo complementarias.

La EPA a fines de 2005 estableció el AERMOD como el modelo de uso recomendado para el análisis de la dispersión de contaminantes a escala local, en sustitución del ISCST3 (Industrial Source Complex Short-Term 3), hasta ese momento usado.⁶ El AERMOD representa un sólido y significativo avance respecto del ISCST3; incorpora las técnicas más avanzadas de parametrización de la capa límite planetaria, dispersión convectiva, formulación de la elevación de la pluma e interacciones complejas del terreno con la pluma. En comparación con el ISCST3, AERMOD contiene nuevos o mejorados algoritmos para: i) la dispersión tanto en la capa límite estable como convectiva; ii) flotabilidad y elevación de la pluma; iii) penetración de la pluma dentro de la inversión elevada; iv) tratamiento de fuentes elevadas y bajas; v) perfiles verticales de viento, temperatura y turbulencia, y vi) tratamiento de receptores en todo tipo de terrenos. Una de las ventajas fundamentales del AERMOD es la modelación de terrenos complejos, lo cual es muy conveniente para las zonas estudiadas en el presente trabajo.

El sistema de modelos AERMOD⁷ incluye dos preprocesadores de datos de entrada: el AERMAP,⁸ para los datos del terreno, y el AERMET,⁹ para los datos meteorológicos. Con el primero, a partir de un Modelo Digital de Elevación de la zona a estudiar, se obtiene la altura respecto del nivel del mar de cada fuente y receptor considerados. Para los receptores se requiere adicionalmente la configuración topográfica entre la fuente y los receptores, con el objetivo de confirmar si hay elevaciones intermedias superiores a la altura del receptor. Por su parte, el AERMET usa las mediciones meteorológicas representativas de la zona en estudio para calcular ciertos parámetros de la capa límite, que se utilizan para estimar los perfiles de viento, turbulencia y temperaturas. Finalmente, el procesamiento de las capas de uso de suelo se realizó con un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS) y la información georrefenciada proporcionada por el INEGI bajo convenio institucional con SEMARNAT.

⁵ Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric
(http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm#aermod).

⁶ United States Environmental Protection Agency (2005).

⁷ United States Environmental Protection Agency (2004b).

⁸ United States Environmental Protection Agency (2004c).

⁹ United States Environmental Protection Agency (2004a).

b) Dispersión regional

Para evaluar la dispersión en el dominio regional se utilizó el Windrose Model Interpreter (WMI), que se basa en el Windrose Trajectory Model (WTM).¹⁰ Éste es un modelo lagrangeano, climatológico, receptor-orientado y de tipo rosa de los vientos en 24 sectores, de 15° cada uno. El tope de la capa de mezcla se considera de una altura promedio anual de 800 m.

El comportamiento de los contaminantes se describe usando una representación a largo plazo de los procesos relevantes: emisión, dispersión, transformaciones fisicoquímicas y deposición. Se obtiene sumando los resultados de las 24 trayectorias que arriban al proceso, ponderadas por las frecuencias de los vientos en cada sector. Cada trayectoria es seguida durante 96 horas antes de llegar a cada sitio receptor. Este procedimiento del WMI, en comparación con los modelos fuente-orientados, tiene la ventaja de que para cada sitio receptor se considera simultáneamente el efecto de todas las fuentes y no cada una por separado, lo cual puede ser significativo en estudios donde las reacciones que dan lugar a contaminantes secundarios son importantes y dependen de las concentraciones de contaminantes primarios existentes.

Los procesos químicos que considera el modelo se muestran en el gráfico 2, en el cual PM identifica al material particulado, NA a los aerosoles de nitrato no especificados (también identificado como pNO_3 en este informe). El aerosol de nitrato total (recuadro con líneas discontinuas a la izquierda) incluye NA y NH_4NO_3 , y el aerosol de sulfato total (recuadro con líneas discontinuas a la derecha) incluye H_2SO_4 y $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. El proceso de emisión está indicado por flechas rojas, las transformaciones químicas por flechas negras, la deposición seca y la deposición húmeda están indicadas por flechas verdes y azules, respectivamente.

Al ejecutar el WMI para un escenario de emisiones dado se examinan las emisiones de cada celda como una fuente, que a su vez interaccionan con las emisiones provenientes de las celdas restantes. Es por esto que para evaluar una fuente en particular se “corre” el WMI dos veces: i) el “caso base”, sin tener en cuenta las emisiones de la fuente (o fuentes) que se desea estudiar, y ii) el “caso real” que incluye las emisiones del “caso base” más las emisiones de la fuente que se estudia.

Finalmente, se restan las concentraciones obtenidas para cada contaminante en el caso base respecto del real, y generalmente se obtiene un incremento en las concentraciones de los contaminantes estudiados, aunque pueden presentarse decrementos para alguno de los contaminantes secundarios, en circunstancias que no favorezcan su formación con respecto a las condiciones del caso base.

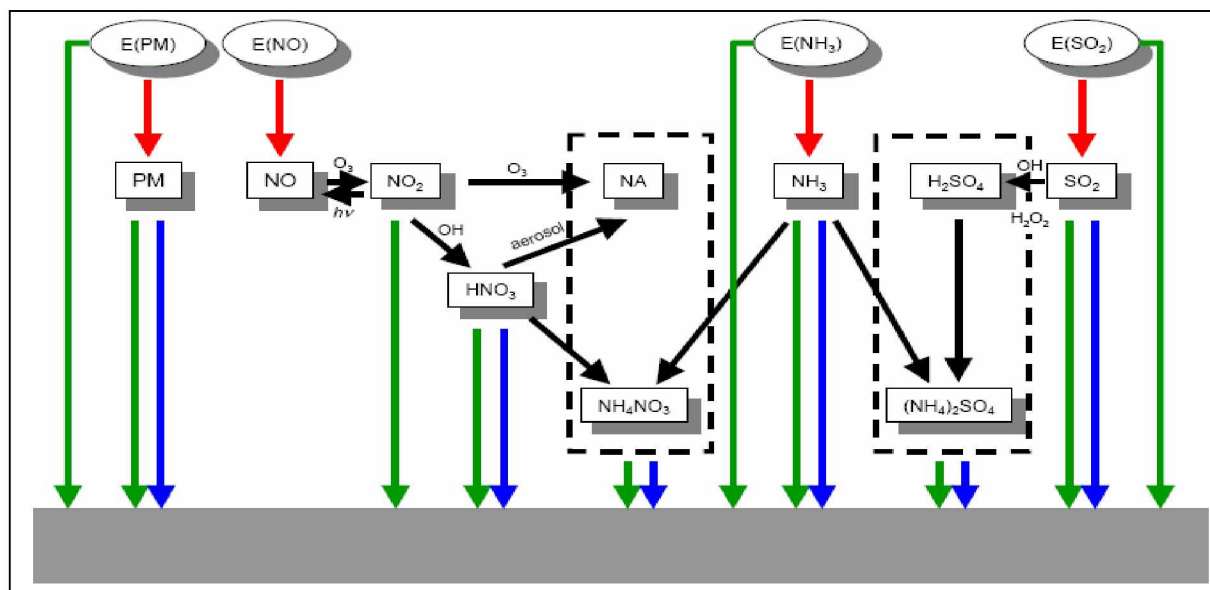
El modelo WTM requiere una base de datos meteorológicos y de emisiones que cubra el dominio regional, y que incluya para cada una de las celdas la información siguiente: i) rosa de los vientos representada por 49 valores (24 valores sobre la probabilidad de que el viento sople en 24 direcciones de 15 grados cada una y otros 24 valores de velocidad media del viento (m/s) en cada una de las direcciones, además de un valor medio único para la velocidad del viento sobre la celda); ii) precipitaciones promedio anuales; iii) emisiones altas y bajas de NO_x y SO_2 ;

¹⁰ Trukenmüller y Friedrich 1995.

iv) emisiones de NH_3 ; v) altura del punto medio de la celda sobre el nivel del terreno, y vi) población total.

Gráfico 2

CICLOS DE VIDA DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS



Fuente: Trukenmüller y otros (2001).

c) Características de los diferentes modelos

Algunas características de los modelos se listan a continuación.

- i) Tanto el AERMOD como el WMI contemplan una sola capa en la estructura vertical de la atmósfera, que se extiende desde el nivel del terreno hasta la altura de la capa límite planetaria.
- ii) El modelo WMI es del tipo climatológico, lo que implica que todos los datos y por supuesto los resultados son valores promedios anuales, en celdas de 55×55 km. Los datos de emisiones, precipitaciones y vientos son obtenidos de bases de datos internacionales.
- iii) El AERMOD no toma en cuenta la formación de especies secundarias, por lo que en el estudio no se evalúa el impacto de sulfatos y nitratos en el dominio local. El WMI sí estima una concentración de sulfatos y nitratos en la celda en la que se encuentran las fuentes de emisión, pero no se abarca en este estudio porque, en general, los modelos empleados para el análisis de la dispersión regional sobreestiman las concentraciones en el dominio local.

3. Evaluación de impactos

La tercera etapa de la Metodología Vías de Impacto tiene por objeto cuantificar los impactos, en este caso de las instalaciones del sector energía, sobre el medio ambiente. A continuación se describe la metodología de evaluación de impactos en salud y se explica el tratamiento de otros efectos, como el cambio climático, entre otros.

a) Impacto en salud

El elemento central de la metodología para evaluar el impacto en salud son las funciones exposición-respuesta (FER) que relacionan la exposición a un contaminante con una respuesta o efecto negativo en la salud. La exposición depende fundamentalmente de la concentración¹¹ de los contaminantes en el ambiente, determinada previamente. La respuesta se cuantifica mediante estudios toxicológicos, clínicos y epidemiológicos, los cuales vinculan un impacto físico observado o síntoma en la salud de un grupo poblacional con la exposición dada a un contaminante.

El estudio considera que las funciones exposición-respuesta para la evaluación de los impactos en salud son lineales y sin umbral, y obedecen a la siguiente ecuación:

$$I_i = \sum_j S_{FERi} * \Delta C_j * POB_j \quad [1]$$

donde: I_i : impacto en salud i ; se expresa en número de casos

S_{FERi} : pendiente de la función exposición-respuesta de un efecto i ; se expresa en número de casos/(persona-año- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

ΔC_j : incremento en la concentración de un contaminante en la localización j ; se expresa en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

POB_j : población en riesgo en la localización j ; se expresa en número de personas

La pendiente de la función S_{FER} se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_{FER} = IRR * I_{ref}, \quad [2]$$

donde: IRR es el Incremento de Riesgo Relativo, se expresa en porcentaje de incremento en el número de casos para un efecto en salud específico por cada $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de contaminante.

I_{ref} es la tasa natural de incidencia (tasa basal); se expresa en número de casos por persona al año.

El Incremento de Riesgo Relativo (IRR), coeficiente estimado a partir de los estudios epidemiológicos, es el cambio en la tasa natural de incidencia por unidad de cambio en la

¹¹ En la literatura internacional también se emplea el término función concentración-respuesta. En rigor debería considerarse la dosis de exposición; es decir, la concentración de contaminante que es inhalada, medida en cada sujeto receptor; sin embargo, cuando no es posible su determinación se emplean las concentraciones en el ambiente.

concentración ambiente ($\%/ \mu\text{g}/\text{m}^3$). La tasa natural de incidencia es el número de nuevos casos de una enfermedad o número de defunciones, en un año, en un grupo de riesgo con respecto a la población total (porcentaje de adultos mayores, niños, y otros). En consecuencia, la pendiente de la función se expresa en casos anuales de enfermedad o muerte, por grupo de riesgo, por unidad de concentración de contaminante en el aire (casos/(año-persona- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)).

Al igual que en el estudio anterior, la evaluación del impacto en la salud se circunscribió al daño por la exposición a los contaminantes críticos en el aire, por su potencial perjuicio en la salud: las partículas (PM_{10}), sulfatos y nitratos y el dióxido de azufre. A fin de evaluar los efectos de los sulfatos y nitratos, contaminantes secundarios formados a partir de sus precursores primarios SO_2 y NO_2 , se siguieron los nuevos criterios de ExternE¹² publicados en el año 2005, que consideran las siguientes relaciones de toxicidad para estimar las pendientes de las funciones para los sulfatos y nitratos:

- toxicidad de sulfatos igual a la de PM_{10} ($S_{\text{FER}} \text{ sulfatos} = S_{\text{FER}} \text{ PM}_{10}$)
- toxicidad de nitratos igual a la mitad de PM_{10} ($S_{\text{FER}} \text{ nitratos} = 0.5 S_{\text{FER}} \text{ PM}_{10}$)

El impacto en salud estimado en el trabajo anterior tuvo como componente principal la mortalidad crónica,¹³ resultado consistente con estudios realizados a nivel internacional. Se aplicó el enfoque de Años de Vida Perdidos y, al no disponer de información para el país, se asumió que una muerte estadística equivale a 10 Años de Vida Perdidos, valor promedio entre los obtenidos para Europa y Estados Unidos, de 11 y 9 años, respectivamente.¹⁴ Por la relevancia de este impacto, el presente estudio profundizó en el análisis de la mortalidad crónica con objeto de afinar los estimados y utilizar las estadísticas del país en la determinación de la pérdida de expectativa de vida.

Existen dos enfoques para determinar la pendiente de la función exposición-respuesta que expresa el impacto de la contaminación atmosférica en la mortalidad: i) casos de mortalidad evitados, y ii) pérdida de expectativa de vida. El primer enfoque estima las FER directamente a partir de los IRR determinados en los estudios epidemiológicos y utiliza como unidad de medida el número de muertes que estadísticamente se correlacionan con incrementos en la contaminación. El segundo enfoque estima la pérdida de expectativa de vida asociada a la exposición, aplicando una metodología alterna para expresar las FER en Años de Vida Perdidos (AVP), en lugar de estimar el número de muertes.

En este estudio se aplicó el segundo enfoque de pérdida de expectativa de vida, al igual que en el proyecto ExternE; la pendiente de la función exposición respuesta (S_{FER}) en

¹² European Commission, ExternE (2005).

¹³ El término mortalidad crónica se aplica a los casos de muerte ocasionados por la exposición prolongada a la contaminación. Para determinar el valor del IRR correspondiente, es necesario realizar estudios muy complejos, de largo plazo, denominados “estudios cohortes”. Requieren el monitoreo de la exposición a la contaminación de poblaciones de estudio y del control de variables, tales como edad, sexo, peso, estatura, dieta, hábitos (tabaco, alcohol), entre otros. Por los recursos que implica su realización, hay pocos estudios realizados principalmente en Estados Unidos.

¹⁴ Estos valores fueron estimados por Spadaro.

AVP/(persona-año- $\mu\text{g}/\text{m}^3$), se obtuvo a partir del Riesgo Relativo calculado en los estudios de cohorte y la pérdida de la expectativa de vida asociada a un incremento de dicho riesgo.¹⁵

Finalmente, en cuanto a la mortalidad aguda,¹⁶ bajo el enfoque de pérdida de expectativa de vida se considera que una muerte aguda equivale a 0,5 Años de Vida Perdidos. Solamente se utiliza una FER de mortalidad aguda con el fin de valorar el impacto del SO_2 . En el caso de las partículas se evalúa únicamente la mortalidad por la exposición de largo plazo (mortalidad crónica) para evitar el doble conteo.

b) Otros impactos

Además de los efectos en la salud, los contaminantes atmosféricos tienen impacto en el cambio climático, en los ecosistemas y en los materiales en general.

Por lo que se refiere al impacto en el cambio climático, las metodologías para su evaluación se basan en dos enfoques: i) cuantificación del daño, y ii) costos de evitar el daño. Bajo el primer enfoque se cuantifican algunos de los impactos atribuibles al cambio climático, tales como el impacto en zonas costeras, agrícolas y forestales, en recursos hídricos y ecosistemas naturales, y en la salud de la población (por ejemplo, casos de defunción por estrés de calor y frío, y malaria). El proyecto ExternE utiliza la última versión del Modelo FUND (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution), que evalúa estos impactos en 16 regiones del mundo.¹⁷

El segundo enfoque se basa en la estimación de los costos de mitigación de emisiones, pues a pesar de los esfuerzos por evaluar el daño, éste aún no ha sido contemplado en su totalidad. Este enfoque considera una meta de reducción de emisiones (por ejemplo, las metas establecidas por país en el Protocolo de Kyoto) y define las opciones tecnológicas posibles para abatir las emisiones a dicho nivel. La valuación económica asigna a cada opción un costo de disminución por tonelada.

El daño a los ecosistemas se evalúa a partir de la carga crítica de un contaminante que puede afectar el equilibrio del ecosistema. La carga crítica se define como “la máxima deposición de compuestos acidificantes que no provoca cambios químicos en los suelos, y que por tanto, no provoca efectos negativos en la estructura y en el funcionamiento de los ecosistemas”.¹⁸ La deposición de compuestos de azufre y nitrógeno causa acidificación de los ecosistemas acuáticos y terrestres que se traduce, entre otras secuelas, en suelos menos fértiles y en afectaciones a los organismos acuáticos que no toleran las condiciones de acidez. Estos efectos pueden pasar inadvertidos por algún tiempo hasta que el umbral de carga crítica es sobrepasado y el deterioro es visible, con los costos económicos y sociales derivados. Para cuantificar el daño en

¹⁵ Leksell y Rabl (2001).

¹⁶ Se denomina “mortalidad aguda” a aquella que se asocia estadísticamente a episodios de exposición a la contaminación en estudios de “series de tiempo”, y “mortalidad crónica”, a la derivada de la exposición a la contaminación en tiempos largos en estudios de “cohorte”.

¹⁷ Véase European Commission, ExternE (2005), *Methodology Update*, pp. 181-188.

¹⁸ OMS (2000).

ecosistemas se toma en cuenta la superficie que rebasa las cargas críticas por la deposición de contaminantes (SO_2 y NO_x) proveniente de las emisiones generadas en la producción de energía.

Para valorar el impacto en materiales existen algunas funciones exposición-respuesta que determinan, por ejemplo, la corrosión adicional inducida por la deposición de SO_2 en materiales de construcción. Este estudio no incluye este impacto.

4. Evaluación monetaria

La cuarta y última etapa de la Metodología Vías de Impacto tiene por objeto estimar el costo económico de los impactos, utilizando la ecuación siguiente:

$$D_i = I_i \cdot CU_i \quad [3]$$

donde: D_i , costo estimado del daño para un impacto i , se expresa en dólares por año

I_i , impacto en salud i calculado por la ecuación [1]; se expresa en casos por año

CU_i , costo unitario de un impacto i , se expresa en dólares por año (por ejemplo, costo por cada caso).

Con este fin, se aplica la teoría económica para determinar la pérdida de bienestar en que incurre la sociedad, en términos de su valor monetario. El supuesto fundamental que subyace a esta valoración es que los individuos son capaces de determinar el beneficio que reciben del consumo de un bien o servicio y, que por tanto, están dispuestos a intercambiar su valor monetario en la medida en que se mantenga su nivel de bienestar.

a) Valoración de impactos en la salud

El valor total para la sociedad relacionado con un efecto adverso en salud tiene dos componentes: el primero, el costo de la enfermedad para el paciente, que incluye el valor total de los recursos para su tratamiento (medicamentos, honorarios, y otros) y la pérdida de productividad por el tiempo que se está enfermo; y el segundo componente, que se refiere al valor que asigna una persona a la posibilidad de evitar el dolor y el sufrimiento y, en términos generales, a estar sano (Voluntad a Pagar, VAP).¹⁹ El primer componente puede valorarse con precios de mercado, mientras que el segundo no tiene precios de mercado que puedan servir como referencia directa.

El estudio anterior de la SEMARNAT y la CEPAL utilizó los dos tipos de valoración en dependencia del impacto analizado. En el caso de la morbilidad, se investigaron únicamente los costos directos de la enfermedad y la pérdida de productividad (a través de precios de mercado en México). Para el caso de la mortalidad se utilizaron valores de Voluntad a Pagar (transferidos de Europa). En el presente estudio se decidió homogeneizar las técnicas de valoración e incluir

¹⁹ Por la naturaleza del bien, este segundo componente es altamente subjetivo, y está evidentemente limitado por el ingreso disponible del individuo. Sin embargo, es la técnica recomendada a nivel internacional para valorar este tipo de “bienes”.

también la Voluntad a Pagar en los costos asociados a la morbilidad.²⁰ Cuando no se contó con valores de VAP de estudios nacionales, se empleó la técnica de transferencia de costos con base en las relaciones de ingreso, entre Europa y México.

Se hizo una revisión a la valoración de la mortalidad en este estudio, por tener el mayor peso en las externalidades. Se tomó como referencia un estudio reciente que determina el Valor Estadístico de la Vida (VEV)²¹ para el caso de México, basándose en compensaciones salariales.²² A partir de dicho valor, se estimó el Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP), con base en la metodología propuesta por Leksell y Rabl (2001) a fin de estimar el costo de la pérdida de vida por exposición prolongada a la contaminación atmosférica (mortalidad crónica).

En el estudio de sensibilidad se presentan los resultados obtenidos al incorporar otros enfoques para valorar la mortalidad, por su importante contribución al total de los costos externos. Se analizó la mortalidad bajo el enfoque de número de casos, en lugar de Años de Vida Perdidos, para lo cual se utilizó el Valor Estadístico de la Vida estimado para México en un primer análisis, y en el segundo, los resultados de transferir el VEV de Estados Unidos, valor que proviene del análisis de 26 estudios, que emplean tanto la técnica de precios hedónicos como la valoración contingente.

b) Valoración de otros impactos

La Metodología de Vías de Impacto requiere estimar la magnitud del impacto en términos físicos y después su valoración. Este enfoque ha sido idóneo para valorar los efectos en salud, pero no ha sido posible su aplicación para valorar los perjuicios en los ecosistemas o en el cambio climático, porque la estimación de los impactos físicos es aún limitada.

El proyecto ExternE estimó los daños en el cambio climático por medio de modelos, en el orden de 9 euros por tonelada de CO₂, estimado conservador, en el sentido de que únicamente se incluyeron en la valoración los daños que se pudieron cuantificar con un grado de confianza razonable. Para la valoración de los efectos en el cambio climático, ExternE consideró, en lugar del costo del daño, el costo de reducir emisiones para Europa, tomando como meta las establecidas por el Protocolo de Kyoto. Dicho costo se encuentra en un rango de entre 5 y 20 euros por tonelada de CO₂. En adición, como referencia utiliza el precio que tiene una tonelada de CO₂ en el mercado derivado del Protocolo de Kyoto, que en octubre de 2005 era de 24 euros por tonelada de CO₂.²³ ExternE considera un valor de 19 euros por tonelada de CO₂, que corresponde a un precio sombra, basado en los costos de mitigar emisiones en los países europeos

²⁰ El estudio anterior omitió la VAP por impactos en morbilidad, con el fin de obtener un estimado conservador. Sin embargo, expertos en la materia han sugerido que es necesario sumar la VAP, con el propósito de tener un estimado completo de la pérdida de bienestar social.

²¹ El Valor Estadístico de la Vida (VEV) es el valor que una comunidad está dispuesta a pagar (VAP) para reducir el riesgo de que ocurra una muerte. Por ejemplo, si en una comunidad cada persona está dispuesta a pagar 50 dólares por medidas para evitar una muerte por cada 10 000 habitantes, el VEV sería de 50 dólares dividido entre 1/10 000, o sea, 500 000 dólares.

²² Hammit e Ibarrarán (2006).

²³ Última fecha de actualización de ExternE. Cabe señalar que posteriormente han habido fluctuaciones importantes del precio de una tonelada de CO₂ en Europa.

para alcanzar un 8% de reducción respecto de su línea base del año 1990, de conformidad con las metas establecidas en el Protocolo de Kyoto para el período 2008-2012.

Por lo que se refiere a la valoración de ecosistemas, ExternE determinó por medio de precios sombra el valor de mantener una hectárea de ecosistema no afectado (una hectárea en la que no se rebasen las cargas críticas de contaminante). Dicho estudio considera que la Voluntad a Pagar por mantener una hectárea de ecosistema inalterado se encuentra en el rango de 63 a 350 euros/ha para Europa y entre 338 a 674 euros/ha para la Unión Europea (EU15).

B. NUEVO PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LAS EXTERNALIDADES

Para la estimación de las externalidades se utilizaron dos módulos integrados al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de Instalaciones Energéticas, SEIA versión 2, basado en la Metodología de Vías de Impacto.

1) ExtLocal para el cálculo de las externalidades en el dominio local a partir de los resultados de estudios de dispersión detallados, usando el ISCST3 o el AERMOD. Este módulo permite además estimar las externalidades en el dominio regional utilizando las ecuaciones ²⁴ del UWM incluido en el modelo SIMPACTS ²⁵ /AIRPACTS ²⁶ del OIEA.

2) ExtReg, para el cálculo de las externalidades en el dominio regional a partir de los resultados del WMI. Esta plantilla también calcula los totales en ambos dominios, teniendo en cuenta los resultados de ExtLocal.

Entre las características más importantes del programa se cuentan las siguientes: es flexible en cuanto a la modelación de la dispersión en el dominio local, ya que permite emplear modelos que se hallan en el estado del arte, definir las dimensiones del dominio local y de sus celdas sin sujetarse a la rejilla regional, así como evaluar varias fuentes que se encuentren dentro del dominio local; en cuanto a la dispersión regional, permite evaluarla al detalle que hace ExternE, adaptando la meteorología, la población y las emisiones de fondo al dominio de la región de México, Centroamérica y el Caribe.

El programa también permite comparar los resultados de análisis simplificados y detallados. Para que la comparación sea representativa se deben estimar previamente todas las variables involucradas en las metodologías simplificadas, fundamentalmente las velocidades de decaimiento y el radio del dominio regional.

²⁴ OIEA (2002a), *AIRPACTS*.

²⁵ OIEA (2003), *SIMPACTS*.

²⁶ OIEA (2002b), *AIRPACTS Manual*.

C. INCERTIDUMBRE ²⁷

La función general de los costos externos en la Metodología Vías de Impacto es un proceso multiplicativo que comprende cuatro variables independientes aleatorias: el incremento de la concentración, la función exposición–respuesta, la densidad de la población y el costo económico. Para este tipo de función general, de acuerdo con el teorema del límite central de estadísticas, la distribución natural es lognormal, la cual se define por la media geométrica μ_g y la desviación geométrica standard σ_g . El intervalo de confiabilidad del 68% se expresa como: $[\mu_g/\sigma_g, \mu_g*\sigma_g]$.

Por lo tanto, la incertidumbre en la evaluación de los costos externos es muy grande, con valores típicos de desviación geométrica estándar entre 3 y 5. Esto significa que el valor real podría ser de tres a cinco veces menor o mayor que el estimado de la media geométrica, de forma que el intervalo entre el valor superior y el valor inferior de los costos varía por un orden de magnitud. En el caso de los contaminantes primarios (PM₁₀, SO₂ y NO_x), dicha desviación se ubica alrededor de 3, siendo mayor en los contaminantes secundarios, particularmente el ozono. Sin embargo, tal como lo expresan Rabl y Spadaro (1999): “...un estimado con una incertidumbre muy alta es mejor que no tener ninguno”.

La incertidumbre en la evaluación de los costos externos obedece a la variabilidad inherente a los parámetros o procesos involucrados en la Metodología de Vías de Impacto. Se pueden mencionar las siguientes:

1) Incertidumbre en los datos; por ejemplo, la ausencia de información meteorológica detallada, la complejidad del terreno, la velocidad de remoción de los contaminantes, la pendiente de las funciones exposición–respuesta, el costo de un día de actividad restringida, entre otros. Los análisis técnicos y los datos disponibles sobre las emisiones de los principales contaminantes (CO₂, PM₁₀, SO₂ y NO_x) sugieren que la incertidumbre es baja. La fiabilidad de los datos recopilados por los operadores y los equipos de las estaciones meteorológicas, en cambio, no siempre es alta.

2) Incertidumbre en los modelos de simulación de la dispersión atmosférica y de las transformaciones químicas, las suposiciones acerca de las relaciones causales entre un contaminante y su impacto en la salud, las suposiciones sobre la forma de la función exposición–respuesta (con umbral o sin él), la transferencia de dicha función de un sitio geográfico a otro, y la falta de consideración de algunos efectos por carencia de conocimiento, entre otras.

3) Incertidumbre en el proceso de selección de variables de carácter político o ético; por ejemplo, tasa de descuento intergeneracional, variación del valor de la vida por edad o ubicación geográfica, Valor Estadístico de la Vida y aversión al riesgo, entre otros.

²⁷ Rabl y Spadaro (1999). Los autores son reconocidos expertos en la metodología de Vías de Impacto, participantes en el Proyecto ExternE por la Escuela de Minas de París.

4) Incertidumbre acerca del futuro; por ejemplo, los avances en el tratamiento de enfermedades, el desarrollo de variedades agrícolas genéticamente más resistentes, cambios en los estilos de vida, y otros.

5) Idiosincrasia del analista; por ejemplo, interpretaciones diferentes de información ambigua o incompleta, errores humanos y fallas al no reconocer la importancia de la incertidumbre en ciertas áreas, entre otros.

II. INFORMACIÓN PARA LOS MODELOS UTILIZADOS

La aplicación de la Metodología de Vías de Impacto para la evaluación de externalidades requirió una serie de datos técnicos, económicos y de salud. La información utilizada corresponde al año 2004, salvo cuando se aclare expresamente otra fecha.

A. INSTALACIONES DEL SECTOR ENERGÍA

Con base en la información estadística del sector energía para el año 2004 y el potencial impacto ambiental de las instalaciones, se seleccionaron los sitios cuyas externalidades serían evaluadas. En el caso del sitio de Tula, en el estado de Hidalgo, se consideraron la Refinería Miguel Hidalgo y las Centrales Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos y Ciclo Combinado Tula. Para la zona de Salamanca, en el estado de Guanajuato, se incluyeron la Termoeléctrica de Salamanca y la Refinería Ing. Antonio M. Amor.

1. Selección de las fuentes fijas de emisión

El Sistema Nacional de Refinación procesó durante 2004 un total de 1 303 000 barriles diarios (bd) de crudo²⁸ y emitió a la atmósfera un total de 501 530 toneladas de contaminantes y 16,12 millones de toneladas de gases de efecto invernadero.²⁹ Del total de emisiones, 413 839 toneladas corresponden a SO₂, 34 312 a NO_x y 17 732 a partículas totales.

Las refinerías evaluadas en este estudio, ubicadas en Tula y Salamanca, procesaron 38% del crudo, y emitieron 41% del volumen de SO₂, 6% de NO_x, 27% de las partículas y 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero del total emitido por el Sistema Nacional de Refinación.

Respecto del sector eléctrico, en el 2004 la Comisión Federal de Electricidad (CFE)³⁰ generó 129 504 GWh en centrales termoeléctricas, que representa el 80% del total de la electricidad generada por la Comisión de Luz y Fuerza del Centro (LFC). Las termoeléctricas seleccionadas aportaron el 21% del total generado en centrales de vapor. La electricidad generada en Tula, por sí misma, representa cerca del 7% del total de la generación nacional.

²⁸ PEMEX (2006).

²⁹ PEMEX (2005a).

³⁰ CFE (2005b).

Cuadro 1

PROCESO DE CRUDO POR REFINERÍA

(Miles de barriles diarios)

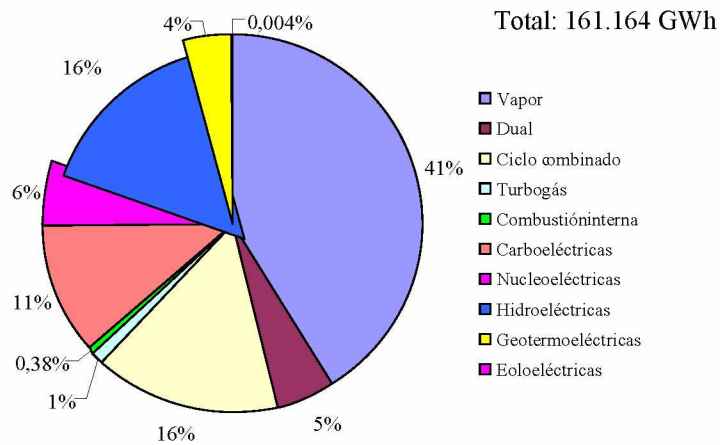
Refinería	Crudo procesado
Total	1 303,4
Cadereyta	212,8
Madero	145,3
Minatitlán	167,0
Salamanca	198,6
Salina Cruz	287,9
Tula	291,9

Fuente: PEMEX, *Anuario Estadístico 2005*.

Gráfico 3

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO, 2004

(GWh)

Fuente: CFE, *Informe de Operación 2004*.
No incluye productores independientes.

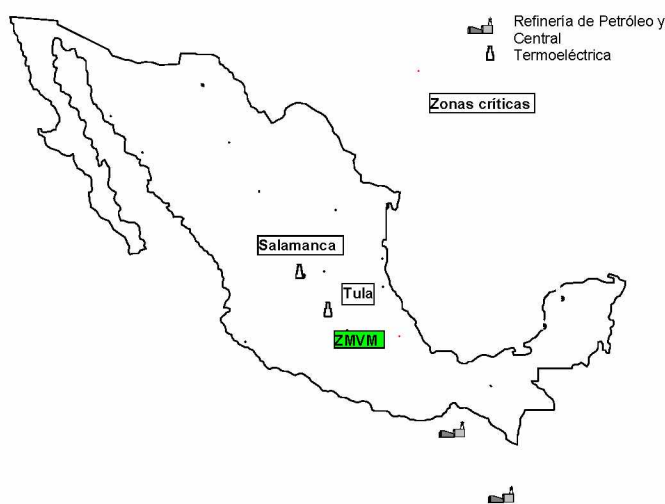
El Sistema Eléctrico Nacional emitió en 2004 un total de 1 229 039 toneladas de SO₂, 163 759 de NO_x, 114 071 de partículas y 84,5 millones de toneladas de gases de efecto invernadero. Las centrales seleccionadas aportaron al total nacional 11% del SO₂, 13% de las partículas, 7% de los NO_x, y alrededor del 11% de los gases de efecto invernadero.³¹

³¹ SENER (2004) (www.sener.gob.mx).

Los sitios seleccionados se ubican en zonas que la NOM-085 considera como zonas críticas, por el volumen de emisiones y por su proximidad a centros de población: el corredor industrial Irapuato-Celaya-Salamanca en el estado de Guanajuato y el corredor industrial Tula-Vito-Apasco en los estados de Hidalgo y de México.

Mapa 1

UBICACIÓN DE LAS INSTALACIONES SELECCIONADAS EN EL ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia.

Este mapa no sanciona fronteras nacionales ni internacionales.

2. Datos técnicos de las fuentes seleccionadas

Las emisiones totales se estimaron a partir del consumo de combustibles en 2004 de cada una de las plantas del sector energía, aplicando los factores de emisión de la EPA (AP-42). En Tula, en el caso de la central termoeléctrica, se consideraron las emisiones de un total de nueve puntos de emisión: cuatro turbinas de gas y cinco calderas de combustión que utilizan combustóleo con un contenido de azufre de 3,6%. Para las turbinas que utilizan gas natural sólo se contabilizaron las emisiones de NO_x y no las de SO_2 y PM_{10} , por ser estas últimas mucho menores que las derivadas del uso de combustóleo.

En el caso de la refinería se contemplaron los puntos de mayor emisión, responsables del 98% de las emisiones, constituidos por cinco puntos asociados a equipos de procesos, siete calderas, tres quemadores elevados (QE_i) y un quemador de fosa (QF) que agrupa a todos los existentes. Las emisiones totales de los tres quemadores elevados se repartieron de acuerdo con el flujo reportado para cada uno de ellos con relación al total, y se modelaron como fuentes puntuales. Conviene mencionar que no se tomaron en cuenta las emisiones de SO_2 para los quemadores de fosa, ni las emisiones contaminantes de los equipos que queman gas de refinería, por no conocerse su composición, pero es necesario señalar que podrían ser muy significativas.

Los datos técnicos de las fuentes consideradas para el análisis de dispersión en Tula y los promedios de emisión derivados de la emisión anual se resumen en el cuadro 2.

Cuadro 2

TULA: DATOS TÉCNICOS DE LAS FUENTES CONSIDERADAS

Clave Punto de emisión COA	Altura (m)	Temperatura (°K)	Velocidad (m/s)	Diámetro (m)	SO ₂ (g/s)	NO _x (g/s)	PST (g/s)
CFE Turbinas							
CC1,6	25,9	419	14,3	5,1		31	0
CC1,7	25,9	429	14,6	5,1		29	0
CC2,5	25,9	407	20,2	5,1		30	0
CC2,6	25,9	419	16,1	5,1		30	0
CFE Calderas							
CTE1	65	436	29,7	6,9	622	73	40
CTE2	65	449	31,0	6,9	815	113	52
CTE3	65	449	31,0	6,9	614	95	39
CTE4	65	449	31,0	6,9	802	114	51
CTE5	65	449	31,0	6,9	583	128	37
Total central termoeléctrica					3 436	643	219
PEMEX Refinería							
BA101A	65,2	588	6,5	2,8	83	7	5
BA101B	65,2	585	6,9	2,8	83	7	5
ABA1/2	73,5	596	4,4	4,2	278	22	18
BA201	55	599	7,9	2,1	47	4	3
VBA1/2	72,5	575	1,9	3,1	47	4	3
CB1	30,8	430	13,5	3,4	155	12	10
CB2	30,8	426	12,8	3,4	155	12	10
CB3	30	424	16,2	3,4	155	12	10
CB4	29	438	6,5	3,4	155	12	10
CB5	45	661	14,5	3,8	155	12	10
CB6	45	442	14,0	4,0	155	12	10
CB7	45	433	17,9	3,8	155	12	10
QE1	71,2	1273	2,2	2,2	605	2	35
QE2	64,4	1273	0,9	2,5	303	1	17
QE3	64	1273	5,5	2,1	983	3	75
QF	0,5	1273	0,0	55,4		22	18
Total refinería					3 514	156	249
Total Tula					6 950	799	468

Fuente: Elaboración propia con base en datos de PEMEX y de CFE de emisiones y en sus Cédulas de Operación Anual (COA).

En el caso de Salamanca se evaluaron cuatro calderas de combustión de la termoeléctrica que utilizan combustóleo con contenido de azufre igual a 3,6%. En la Refinería Ing. Antonio M. Amor se consideraron sólo los puntos de mayor emisión, responsables de 98% de las emisiones, constituidos por siete puntos asociados a procesos, seis calderas y un quemador que agrupa a todos los existentes. El quemador se modeló como una fuente puntual. Las emisiones se estimaron también con base en los factores de emisión de la EPA (AP-42) y en el consumo de combustible durante 2004, excepto para los quemadores, para los cuales se consideró la información proporcionada por PEMEX Refinación. Al igual que en Tula, no se incluyeron las emisiones fugitivas desde los tanques de almacenamiento ni las emisiones resultantes de la quema de gas de refinería.

Los datos técnicos de las fuentes, usados en los cálculos de dispersión en la zona de Salamanca, se presentan en el cuadro 3.

3. Dominio local de modelación

Para la zona de Tula se delimitó como dominio local un cuadrado de 100x100 km dividido en celdas de 2x2 km centrados en las coordenadas ³² X=472 500, Y=2 157 500, lo que da un total de 2 500 puntos receptores. El punto receptor más al sur y al oeste se ubica en las coordenadas X=423 500, Y=2 157 500. En Salamanca se identificaron también un total de 2 500 puntos receptores, representados en los puntos centrales del mismo número de celdas de 2x2 km en que se seccionó un dominio de 100x100 km, centrado en las coordenadas X= 273 000, Y= 2 277 000. El receptor más al sur y al oeste se ubica en las coordenadas X=224 000, Y=2 228 000.

Para obtener la población en cada celda del dominio local, se interceptaron con un Sistema de Información Geográfico (SIG) la capa de población original de México y las rejillas de 100x100 km con celdas de 2x2 km como capas que representan los dominios locales, tanto en Tula como en Salamanca; mediante una suma pesada se obtuvo la población en cada celda. La población total del dominio local en Tula es de 6 369 906 habitantes, lo que implica una densidad promedio de 579 habitantes/km²; la de Salamanca es de 2 254 138 habitantes y 225 habitantes/km².

Para obtener la información topográfica se usó el Modelo Digital de Elevación de México. ³³ Además, se procesó la capa de usos del suelo de México, ³⁴ utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) a fin determinar el porcentaje de cada una de las categorías en cada sector y por tanto la categoría de uso de suelos más representativa para cada uno de los 36 sectores de 10° en un plano de coordenadas polares del dominio, con un radio de 50 km, con centro en la refinería. Esta información se requiere para considerar la influencia del tipo de suelo en la dispersión. Una vez definida la categoría predominante para cada sector, se alimentó el modelo considerando la correspondencia entre las categorías definidas en la capa de uso de suelos de México y las categorías en el AERMET y el AERMOD, que se muestran en el cuadro 4.

³² Las coordenadas se refieren al sistema de referencia UTM Zona 14.

³³ INEGI, Licencia DGAD-0111/2005. Perfiles de uso de suelo, versión 1.2.

³⁴ *Ibidem*.

Cuadro 3

SALAMANCA: DATOS TÉCNICOS DE LAS FUENTES CONSIDERADAS

Clave Punto de emisión COA	Altura (m)	Temperatura (°K)	Velocidad (m/s)	Diámetro (m)	Emisiones, g/s		
					SO ₂	NO _x	PST
Central termoeléctrica							
CFE1	51,2	425	28,9	3,9	126	23	10
CFE2	51,2	423	31,5	3,9	127	22	10
CFE3	64,6	438	20,1	2,7	586	47	46
CFE4	49,7	417	29,2	3,4	376	33	29
Total termoeléctrica					1 215	125	95
Refinería							
LGH301	2,9	592	19,2	1,2	9	1	1
LBH1	34,2	565	4,2	2,0	30	2	2
LBH5	17,3	473	5,5	2,7	8	1	1
LBH9	16,0	473	4,1	3,1	8	1	1
U5F	48,7	705	3,8	2,3	24	2	2
RDBA	60,8	757	1,5	2,6	181	12	14
ASBA	77,0	590	11,1	2,1	62	4	5
CB3	25,0	480	7,9	2,5	98	6	8
CB4	25,0	459	6,6	2,5	101	6	8
CB5	25,0	463	6,2	2,5	101	6	8
CB6	43,0	420	6,8	2,7	6	0	1
CB7	43,0	426	8,1	2,7	31	2	2
CB9	40,0	514	5,7	2,5	85	5	7
QE1	61,5	1,273	3,0	0,9	720	60	48
Total refinería					1 462	107	106
Total Salamanca					2 677	232	201

Fuente: Elaboración propia con base en datos de PEMEX y de CFE de emisiones y en sus Cédulas de Operación Anual (COA).

En Tula, para la mayoría de los sectores la categoría predominante es la de terreno agrícola, excepto en dos sectores donde predominan los pastizales y en uno los bosques. En Salamanca, la categoría predominante es también el terreno agrícola, excepto en dos sectores donde predominan los bosques y tres sectores donde predominan los pastizales.

Cuadro 4

**CORRESPONDENCIA ENTRE LAS CATEGORÍAS DE LA CAPA DE USO
DE SUELO DE MÉXICO Y LAS DEL AERMET Y AERMOD**

Capa de uso de suelos	Categorías AERMET	Categorías AERMOD
Asentamiento humano		Área suburbana, con vegetación
Zona urbana	Zona urbana	Zona urbana sin vegetación
Cuerpo de agua	Cuerpo de agua	Cuerpo de agua
Agricultura de riego		
Agricultura de temporal	Terreno agrícola	Terreno agrícola
Bosque cultivado		
Bosque de coníferas		
Bosque de encino	Bosque de coníferas	
Selva caducifolia	Bosque caducifolio	Bosques
Desprovisto de vegetación		
Especial (otros tipos)		
Matorral xerófilo		
Sin vegetación aparente	Desierto	Terreno árido, principalmente desierto
Vegetación hidrófila	Pantano	Terreno húmedo no boscoso
Pastizal		
Vegetación inducida	Pradera	Terreno de pastizal

Fuente: Elaboración propia con base en las categorías de uso de suelo definidas por el INEGI para México y las categorías establecidas en las guías de la EPA para la implementación de los modelos AERMET Y AERMOD.

4. Dominio regional de modelación

La base de datos regional cubre el área de México, el Caribe, América Central y la península de la Florida. Contiene datos en una resolución de 55x55 km, en una rejilla con origen³⁵ en 120 Oeste, 5 Norte, que abarca 120x60 celdas. Los receptores evaluados en el dominio regional se definieron como las celdas que se encuentran a menos de 1 500 km de la refinera de petróleo en cada caso, rango típico de los estudios de dispersión regional.

Para obtener los datos de población por celdas del dominio regional se procedió en forma similar al dominio local: con un SIG se interceptó la capa de población que cubre todo el dominio regional con la capa que representa dicho dominio.

También se determinó la población total en un área de 1 000 km de radio centrada en el mismo punto que el dominio local, tanto en Tula como en Salamanca, con el fin de determinar el

³⁵ Se utilizó la proyección Cónica de Lambert.

impacto regional, usando metodologías simplificadas para comparar con los resultados del estudio de 2004. La población total en el dominio de 1 000 km de radio centrado en Tula asciende a 89 777 703 habitantes, con una densidad regional de 28,6 habitantes/km², en tanto que en Salamanca asciende a 86 596 984 habitantes, con una densidad regional de 27,6 habitantes/km².

B. DATOS METEOROLÓGICOS

1. Datos meteorológicos para la dispersión local

Para la zona de Tula se utilizaron como datos meteorológicos básicos los medidos por la estación *in situ* de la central termoeléctrica, localizada en las coordenadas 20,050N y 99,340O. La estación registra dirección y velocidad del viento, desviación estándar de la dirección horizontal del viento, temperatura, presión, radiación solar y humedad relativa. Los datos de cada 15 minutos (4 por hora) para el año 2004 se procesaron para obtener los datos horarios.

Se escogió como estación de superficie representativa la de Huichapan, localizada en 20,39N y 99,66O, unos 47 km al noroeste de Tula. Registra cada 10 minutos la dirección y velocidad del viento, temperatura, presión, radiación solar, humedad relativa y tasa de precipitación; asienta además el valor máximo de la dirección y velocidad del viento en ese mismo período. De 52 704 datos que debían ser procesados para obtener los datos horarios, estuvieron disponibles 50 534, 95,9% del total.

Como estación de aire superior representativa se escogió la del aeropuerto de la ciudad de México, la que registra los datos de aire superior más cercano a la zona de estudio. Se localiza en 19,417N y 99,067O, a unos 83 km de Tula en dirección sur-sureste. Procesa la información de dirección y velocidad del viento, temperatura y presión a diferentes alturas, generalmente dos veces al día. Del total de 732 datos que debían ser procesados se contó con 624, 85,2% del total. El código fuente de la EPA fue modificado para poder procesar datos de presión barométrica de superficie inferiores a 800 mbar que prevalecen en el dominio local.

En el caso de la zona de Salamanca, se escogió como estación *in situ* la de Nativitas, perteneciente a la Red Ambiental de Monitoreo de Salamanca. Esta estación registra datos horarios de dirección y velocidad del viento, desviación estándar de la dirección horizontal del viento, temperatura, presión, radiación solar y humedad relativa. La estación se localiza en 20,57N, 101,19O.

La estación de superficie representativa fue la de la presa Allende, la cual registra cada 10 minutos la dirección y velocidad del viento, la temperatura, presión, radiación solar, humedad relativa y tasa de precipitación. De 52 704 datos que debían ser procesados, están disponibles 51 973 (98,6% del total). La estación se localiza en 20,84N, 100,82O. En esta zona no se utilizaron datos de aire superior por considerarse que ninguna de las estaciones que los registran es representativa del dominio local. En este caso se aplicaron criterios para la determinación de la altura de capa de mezcla por métodos indirectos.

Para estimar la deposición de gases en el AERMOD se utilizaron los parámetros recomendados en la literatura internacional, adecuados, en su caso, a las condiciones del país.

2. Datos para dispersión regional

El modelo utilizado WTM requiere de una base de datos meteorológicos y de emisiones que cubran el dominio regional. Una parte considerable de la información necesaria se encuentra disponible en la base de datos que ha integrado la Sede Subregional de la CEPAL en México. Dicha base de datos fue elaborada con anterioridad a este estudio, como parte de un proyecto de investigación entre el Instituto Nacional de Ecología de la SEMARNAT, CubaEnergía y la CEPAL. La base cuenta con casi 400 000 datos, para lo cual se procesaron casi 158 millones de datos de las diferentes fuentes de información. La definición de las principales variables se presenta a continuación.

a) Rosa de los vientos

Para la creación de las rosas de los vientos se partió de la base de datos NCEP/NCAR Reanalysis Data³⁶ (United States of America, National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research). Para obtener promedios anuales más representativos fueron procesados cinco años de datos (2000-2004).

En el procesamiento de los datos de viento para el WTM se seleccionan los componentes del viento a 925 mbar; éstos corresponden aproximadamente a 800 m de altura sobre el nivel del mar. Los datos del Reanalysis Data tienen una resolución de 2,5x2,5 grados de latitud-longitud, así que una vez obtenidos los dos ficheros anuales con los componentes de dirección y velocidad del viento para todas las celdas (5 ficheros para cada componente, por utilizarse 5 años de datos), se utilizó el programa Windrose para calcular las rosas de vientos más probables o promedio en una rejilla de 0,5x0,5 grados. El programa Windrose fue el usado con el mismo propósito en las diferentes implementaciones del EcoSense (Europa, China, América del Sur y Federación de Rusia).

A fin de mejorar la selección de los datos de viento y las rosas de viento resultantes en dependencia de la altura del terreno, se realizaron modificaciones adicionales al programa Windrose, las cuales están orientadas a promediar los componentes del viento de los dos niveles isobáricos, entre los cuales se encuentra el valor de 800 m sobre el nivel de la superficie.

Para obtener los datos de vientos en las celdas en la proyección seleccionada (como resultado del Windrose se obtienen los datos de celdas de 0,5x0,5 grados sobre una proyección latitud/longitud), se procesó el fichero salido del Windrose directamente en un SIG, realizando un promedio proporcional de las áreas interceptadas. Finalmente, se obtienen para cada una de las 7 200 celdas del dominio seleccionado una rosa de vientos promedio en el quinquenio 2000-2004 representada por 49 valores: 24 valores que representan la probabilidad de que el viento sople en 24 direcciones de 15 grados cada una y otros 24 valores de velocidad media del viento (m/s) en

³⁶ NCEP/NCAR, Reanalysis Data (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds090.0/data/pgbf00-grb2d>).

cada una de las direcciones. Además se obtuvo un valor medio único para la velocidad del viento sobre la celda, que puede usarse alternativamente, sustituyendo la información más detallada de la velocidad en cada dirección.

b) Precipitaciones

Para obtener las precipitaciones promedio anuales por celda se utilizaron dos bases de datos del Global Precipitation Climatology Center (GPCC).³⁷ La primera, llamada “producto de monitoreo” (*Monitoring product*), de acceso libre, se basa en datos de calidad controlada de unas 7.000 estaciones de monitoreo; contiene datos asociados a rejillas de cobertura global con resoluciones de 2,5 y 1 grados, desde 1986 hasta el presente. La segunda, conocida como “GPCP Versión 2 Combined Precipitation Data Set”, contiene estimaciones de las precipitaciones basadas en la combinación de mediciones y observaciones por satélite, así como el error de dicha estimación, con una resolución de 2,5 grados.

c) Emisiones de fondo

Para el cálculo de las concentraciones de SO₂, NO_x, sulfatos y nitratos en todas las celdas del dominio, el WTM utiliza como datos de entrada las emisiones naturales y antropogénicas de SO₂, NO_x y NH₃. Las emisiones de SO₂ y NO_x se obtuvieron de la base de datos global EDGAR,³⁸ que tiene información del año 2000, con una resolución de un grado. En esta base de datos las emisiones se reportan clasificadas en 81 sectores resultantes de subdividir los siguientes grupos de fuentes: combustibles fósiles, incluyendo tráfico marítimo y aéreo; biocombustibles; procesos industriales; agricultura, uso de la tierra incluyendo quema intensa de biomasa; uso y producción de compuestos halocarbonados y gases florados; tratamiento de desechos, y otras fuentes antropogénicas no incluidas en los grupos anteriores.

Los datos se descargan como archivos de texto, uno para cada sector, que contienen información de la ubicación: longitud y latitud y la emisión clasificada en alta o baja. Se estimó que las emisiones provenientes del tráfico aéreo y las provenientes de generación eléctrica son emisiones altas (en realidad, aquellas emitidas a más de 100 m de altura), mientras que el resto de éstas se consideran bajas.

Las emisiones de NH₃ se obtienen a partir de dos bases de datos de cobertura global.^{39 40} La primera tiene una resolución de medio grado e incluye las emisiones de 1995 sólo para fertilizantes inorgánicos y desechos de animales, los dos sectores cuya contribución es la más relevante en cuanto a emisiones de NH₃. Las emisiones correspondientes a otros sectores se extraen de la segunda de estas bases de datos, de un grado de resolución, que incluye emisiones para 1990 clasificadas en sectores de los que se excluyen los anteriormente mencionados.

³⁷ The Global Precipitation Climatology Centre (<http://www.dwd.de/research/gpcc>).

³⁸ EDGAR emission data base (<http://arch.rivm.nl/env/int/coredata/edgar.html>).

³⁹ NH₃ International Emission Inventory (<http://arch.rivm.nl/databases/nh3>).

⁴⁰ GEIA (Global Emissions Inventory Activity) (<http://www.rivm.nl/geia/data/Ammonia>).

El valor de concentración de fondo de ozono troposférico utilizado en este estudio es de 40 ppb: se seleccionó con base en la referencia ⁴¹ y las implementaciones del WTM en Europa y el Sudeste Asiático. El valor seleccionado para la concentración de fondo de radicales OH, de 1 300 000 moléculas/cm³, corresponde a la concentración a 20° de latitud, que es el paralelo central del dominio de estudio. ⁴²

C. INVENTARIO DE EMISIONES DE MÉXICO

Las emisiones de SO₂, NO_x y NH₃ sobre México fueron actualizadas utilizando el Inventario nacional de emisiones de México de la SEMARNAT ⁴³ del año 1999. Para ello se procesó con un SIG la capa de municipios de México, incorporándole campos con los valores de las emisiones de cada contaminante. Sobre estos valores se realizaron las siguientes modificaciones en los municipios donde se ubican las 12 mayores centrales termoeléctricas y las seis refinerías del país: 1) para las refinerías se consideran las emisiones que señala el inventario de 2004 del informe de PEMEX, y 2) para las 12 centrales termoeléctricas analizadas previamente se empleó el inventario de emisiones que reporta la Secretaría de Energía para 2004.

Se clasificaron las emisiones en altas y bajas en función de la altura de las chimeneas reportadas para cada unidad de las termoeléctricas; todas las emisiones provenientes de refinerías fueron identificadas como bajas. Para las centrales carbo-eléctricas (Río Escondido y Carbón II) se utilizó el inventario de SEMARNAT, a raíz de que había un problema con el reporte de NO_x en los cálculos de SENER para el año de referencia. Las emisiones de ambas centrales resultaron altas.

Los municipios de Tula y Salamanca incluyen únicamente las emisiones de SO₂ provenientes de la central termoeléctrica y de la refinería para el año 2004, según fueron calculadas para el estudio.

Para las emisiones de NO_x en Salamanca se utilizó el criterio anterior, en tanto que en Tula se tomaron en cuenta 10 000 toneladas para la refinería, más lo reportado en 1999 para la termoeléctrica. Al sustituir estos valores por los reportados para el año 2004, se dejó el remanente del inventario para contemplar otras fuentes en el área. En los municipios de Madero, Salina Cruz y Cadereyta se consideró sólo la emisión de la refinería.

En el gráfico 4 se muestran las emisiones altas de SO₂ y NO_x actualizadas a la base de datos. Se aprecia que las únicas emisiones altas son las de algunas centrales termoeléctricas que descargan a chimeneas que sobrepasan los 100 m de altura.

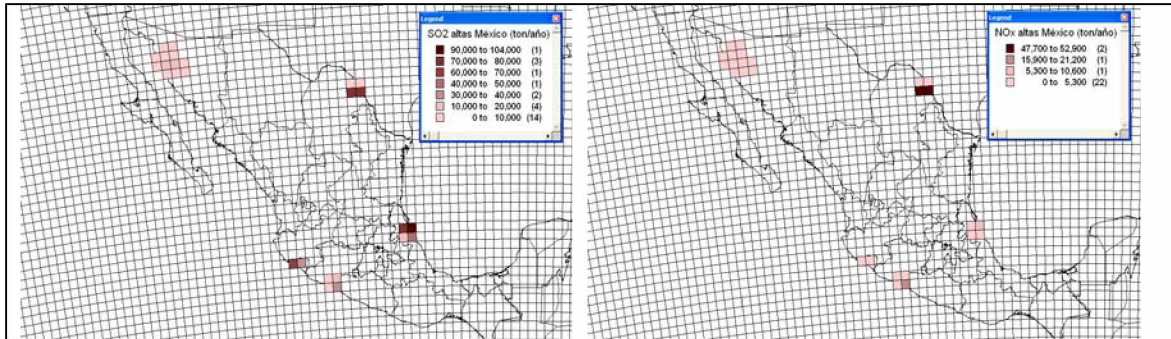
⁴¹ Logan (1999).

⁴² Spivakovsky y otros (2000).

⁴³ SEMARNAT (2006b), *Inventario Nacional de Emisiones*.

Gráfico 4

**MÉXICO: EMISIONES ALTAS DE SO₂ Y NO_x
ACTUALIZADAS A LA BASE DE DATOS**

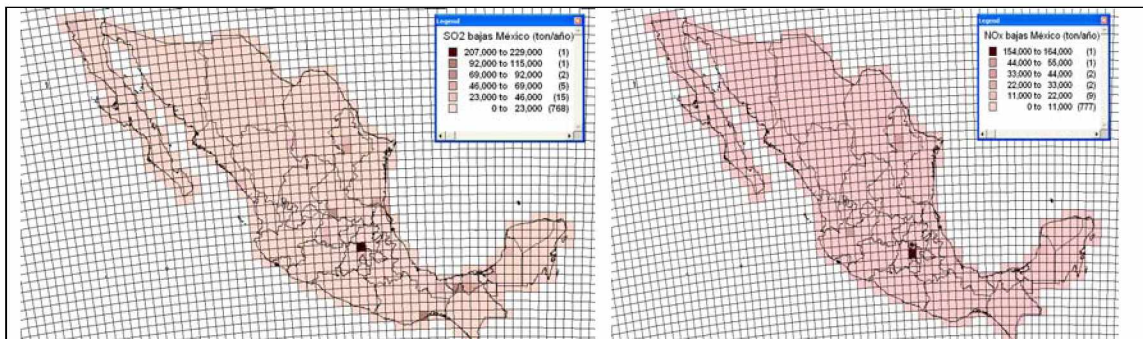


Fuente: Elaboración propia con base en el Inventario Nacional de Emisiones de México.

En el gráfico 5 se aprecian las emisiones bajas para SO₂ y NO_x. Las centrales termoeléctricas constituyen la fuente más importante para ambos contaminantes; la mayor parte de los valores que resaltan sobre la media tienen este origen.

Gráfico 5

**MÉXICO: EMISIONES BAJAS DE SO₂ Y NO_x
ACTUALIZADAS A LA BASE DE DATOS**



Fuente: Elaboración propia con base en el Inventario Nacional de Emisiones de México.

D. FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA CONSIDERADAS

Para la selección de las funciones exposición-respuesta se revisaron estudios epidemiológicos disponibles en México, así como investigaciones internacionales de referencia. Entre ellos se seleccionaron los valores de Incremento del Riesgo Relativo en número de casos para un aumento en la concentración de un contaminante específico, tanto para morbilidad como para mortalidad. En

el caso de la morbilidad, a partir de dichos incrementos y considerando las tasas de incidencia, fracciones de población y grupos de riesgo en México, se determinaron las pendientes de las funciones exposición–respuesta. Por lo que se refiere al impacto en mortalidad, a partir de las estadísticas de mortalidad y fracción de la población por grupos de edades de México se determinó la pérdida de expectativa de vida por la exposición prolongada a PM₁₀, en función del incremento de riesgo reportado en los trabajos. A continuación se presenta la información utilizada.

1. Tasas de Incremento de Riesgo Relativo

Para la selección de los valores de Incremento de Riesgo Relativo (IRR) se emplearon dos meta-análisis y un estudio independiente. El primero de ellos es el meta-análisis realizado en el marco del proyecto Ecosistema Urbano y Salud de los Habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México, revisado y publicado por el Banco Mundial.⁴⁴ De este estudio se tomaron los valores de IRR para evaluar el impacto de partículas, y a partir de ellos se derivaron los correspondientes a sulfatos y nitratos, siguiendo los últimos criterios de ExternE 2005 sobre toxicidad para los contaminantes secundarios, que calcula la toxicidad de los sulfatos igual a la de las partículas PM₁₀ y la de los nitratos igual a la mitad, como se explicó en el primer capítulo.

Del segundo meta-análisis,⁴⁵ elaborado por Stieb y otros (2002), se obtuvo el valor de IRR para la mortalidad aguda por SO₂; este meta-análisis evaluó 109 estudios llevados a cabo en todo el mundo, incluido México. Para el caso de las admisiones hospitalarias por SO₂, fue usado el estudio de Spix y otros (1998),⁴⁶ al no contar con un meta-análisis. En el cuadro 5 se exponen los valores de IRR utilizados en el estudio.

2. Tasas de incidencia y de mortalidad

Las tasas de incidencia para el estudio y las fracciones de la población para cada padecimiento se muestran en el cuadro 6. La información de tasas de incidencia proviene del Sistema Nacional de Información en Salud⁴⁷ (SINAIS) —administrado por la Secretaría de Salud— y se refiere a los impactos en los que se consiguieron datos con la desagregación necesaria. Para los casos en que esto no fue posible, se utilizó la tasa basal estimada para la Zona Metropolitana del Valle de México, ya que se consideró preferible frente a la de otros países. Los datos de población son los reportados por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).

⁴⁴ César y otros (2002). Este meta-análisis incluyó 126 estudios epidemiológicos y da un mayor peso a los resultados de México.

⁴⁵ Stieb y otros (2002).

⁴⁶ Spix y otros (1998).

⁴⁷ Acerca del SINAIS. <http://www.salud.gob.mx/unidades/dgied/sinais/acercade.htm>.

Cuadro 5

INCREMENTO DE RIESGO RELATIVO (IRR)

(%/µg/m³)

Efecto	Grupo de población en riesgo	IRR a/ para PM10	IRR para SO2
Bronquitis crónica	Mayores de 30 años	0,360	-
Días de actividad restringida	Adultos	0,774	-
Ingresos hospitalarios, respiratorios	Población total	0,139	0,040 b/
Ingresos hospitalarios, cardiovasculares	Adultos mayores de 65 años	0,060	-
Visitas a salas de urgencia (respiratorias)	Población total	0,311	-
Crisis aguda de asma	Asmáticos	0,774	-
Mortalidad por exposición aguda	Población total	-	0,034 c/
Mortalidad por exposición crónica	Adultos mayores de 30 años	0,384	-

Fuente: a/ César y otros (2002); b/ Spix y otros (1998), y c/ Stieb y otros (2002).

3. Funciones exposición–respuesta para mortalidad estimadas con el enfoque de pérdida de expectativa de vida

Para evaluar la mortalidad crónica, Leksell y Rabl ⁴⁸ desarrollaron una metodología que estima la pendiente de la función exposición–respuesta para la mortalidad asociada a la contaminación atmosférica (S_{FER}) en Años de Vida Perdidos (AVP/(persona-año-µg/m³)), a partir del Riesgo Relativo reportado en los estudios de cohorte y la pérdida de la expectativa de vida asociada a dicho riesgo. Dicha metodología se aplicó al caso de México, con la asesoría de Spadaro en el marco de este estudio, considerando un análisis de tipo estático. ⁴⁹

⁴⁸ Leksell y Rabl (2001).

⁴⁹ Spadaro, comunicación personal. La metodología completa desarrollada por Leksell y Rabl considera un factor para medir el decremento del riesgo, una vez que se termina la exposición, con base en los resultados obtenidos en estudios con población fumadora, en un enfoque dinámico. De acuerdo con Spadaro, el enfoque estático es aceptable ante la complejidad del análisis dinámico, pues el valor obtenido tiene una precisión del orden de 15%, que es menor a otras incertidumbres asociadas.

Cuadro 6

TASA DE INCIDENCIA Y FRACCIONES DE POBLACIÓN

(Casos-persona-año/fracción del total)

Efecto	Grupo de población en riesgo	Tasa de incidencia (casos-persona-año)	Fracción de la población d/
Bronquitis crónica	≥ 30 años	0,00700 a/	0,410
Días de actividad restringida	Adultos	6,46000 a/	0,540
Ingresos hospitalarios (respiratorios)	Población total	0,00260 b/	1,000
Ingresos hospitalarios (cardiovasculares)	≥ 65 años	0,00210 b/	0,050
Visitas a salas de urgencia (respiratorias)	Población total	0,03200 a/	1,000
Crisis aguda de asma	Asmáticos	0,12740 a/	0,056 e/
Mortalidad aguda	Población total	0,00448 c/	1,000
Mortalidad crónica	≥ 30 años	0,00936 c/	0,410

Fuente: a/ César y otros. *Improving Air Quality in Metropolitan Mexico City*, WB, 2002; b/ Secretaría de Salud, SINAIS, Sistemas Automatizados de Egresos Hospitalarios, México, 2005a; c/ Secretaría de Salud, SINAIS, *Mortalidad 2004*, México, 2005b; d/ INEGI, *Población total por grupos quinquenales de edad según sexo, 1950 a 2005*, México, 2006; e/ El porcentaje total de población con asma se estimó considerando 5% de adultos y 8% de niños, de acuerdo con estimaciones del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias.

En términos generales, la metodología estima la pendiente de la función exposición-respuesta a partir de la siguiente ecuación:

$$S_{FER} = F_l \bullet \frac{\Delta T_L}{T_L \Delta C} \text{ AVP}/(\text{persona-año-}\mu\text{g}/\text{m}^3) \quad [4]$$

donde: F_l : factor de ajuste que considera el retraso entre la exposición y el impacto en la población potencialmente en riesgo, así como la capacidad de autorecuperación del cuerpo humano después de una exposición. Se le denomina “factor de latencia”. Como el grupo de riesgo para esta función es la población mayor de 30 años, generalmente se asume el valor de este parámetro cercano a dicha fracción de la población, 0,6 para Europa, 0,41 para México.

T_L , es la expectativa de vida de la población; se expresa en años.

ΔT_L , es la pérdida de expectativa de vida por una exposición crónica; se expresa en Años de Vida Perdidos (AVP).

ΔC , es la variación en la concentración del contaminante para la cual se estimó el Riesgo Relativo RR, se expresa en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La expectativa de vida de la población (T_L) se estima a partir de las estadísticas de mortalidad y de la fracción de la población por grupos quinquenales de edades en México,

reportadas por la Secretaría de Salud y el INEGI,⁵⁰ considerando un Riesgo Relativo igual a la unidad y aplicando las funciones de probabilidad de supervivencia y de determinación de expectativa de vida⁵¹ para el caso de México. Esta estimación dio como resultado una expectativa de vida de 75,2 años, valor semejante al valor oficial reportado para el año 2004.

Una vez que se ha estimado la expectativa de vida de la población, se calcula la expectativa de vida asociada a una exposición crónica a la contaminación atmosférica. Para ello se utilizó un Valor de Riesgo Relativo que considera el incremento en el riesgo asociado a un aumento en la concentración de PM_{10} en el aire ($RR = 1 + IRR$). El Incremento de Riesgo Relativo considerado fue de 3,84% por un aumento de $10 \mu g/m^3$ en la concentración ambiente de PM_{10} , valor que corresponde al reportado por César y otros (2002) (véase el cuadro 5). La expectativa de vida considerando la exposición disminuye a 74,7 años. Por lo tanto, la pérdida de expectativa de vida, ΔT_L , resulta ser de 0,45 Años de Vida Perdidos (AVP). Aplicando la ecuación [4] se encuentra que la pendiente de la función exposición–respuesta para mortalidad por exposición crónica para mayores de 30 años a PM_{10} es de $2,49E-04$ AVP/(persona-año- $\mu g/m^3$).

Para evaluar la mortalidad por exposición aguda a SO_2 , se utiliza el IRR del estudio de Stieb y otros (2002) y se establece, al igual que ExternE, que una muerte por exposición aguda equivale a 0,5 AVP. Así, $S_{FER} = IRR \cdot I_{ref} \cdot 0,5$ AVP/(persona-año- $\mu g/m^3$).

4. Resumen de funciones exposición–respuesta aplicadas en el estudio

Con la información de IRR del cuadro 5, las tasas de incidencia y fracciones de población presentadas en el cuadro 6, así como la aplicación de la metodología para la estimación de la pendiente de la mortalidad en Años de Vida Perdidos, se calcularon las pendientes de las funciones exposición-respuesta. En el cuadro 7 se presentan las funciones que se aplicaron para la determinación de las externalidades.

⁵⁰ INEGI/Secretaría de Salud (2005).

⁵¹ La función de probabilidad de supervivencia y la determinación de expectativa de vida se calculó utilizando la herramienta programada por Spadaro y consultores de la CEPAL.

Cuadro 7

FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA

(Morbilidad: casos-persona-año/Mortalidad: Años de Vida Perdidos)

Funciones exposición-respuesta	Pendiente (casos/(año-receptor- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	PM ₁₀ y sulfatos	Nitratos	SO ₂
Bronquitis crónica (adultos mayores de 30 años)	1,03E-05	5,16E-06	
Admisiones hospitalarias respiratorias (población total)	3,61E-06	1,81E-06	1,04E-06
Días de actividad restringida (adultos entre 20 y 65 años)	2,70E-02	1,35E-02	
Visitas a salas de urgencia (población total)	9,95E-05	4,98E-05	
Crisis aguda de asma (asmáticos)	5,50E-05	2,75E-05	
Admisiones hospitalarias cardiovasculares (adultos mayores de 65 años)	6,30E-08	3,15E-08	
Mortalidad crónica (adultos mayores de 30 años)	2,46E-04	1,23E-04	
Mortalidad aguda a/ (población total)			7,62E-07

Fuente: Elaboración propia con base en la información presentada en los cuadros 5 y 6.

a/ La función de mortalidad aguda se aplica únicamente a SO₂; considera que una muerte aguda equivale a seis meses de vida perdidos.**E. COSTOS ECONÓMICOS****1. Morbilidad**

Como se explicó en el capítulo I, los costos de los casos de morbilidad incluyen los costos directos de la enfermedad, la pérdida de productividad y la Voluntad a Pagar.

El costo directo de enfermedad utilizado corresponde al nivel III de atención (el más completo) del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), estimado por el Instituto Nacional de Ecología y el Instituto Nacional de Salud Pública, en el marco del estudio *The Local Benefits of Global Air Pollution Control in Mexico City*.⁵² Los valores presentados en dicho estudio se encuentran en dólares de 2001 y fueron actualizados a dólares de 2004.⁵³ El costo directo de enfermedad (costo del tratamiento) se halla altamente influido por las condiciones propias del lugar en que se brindan los servicios médicos y por aspectos socioeconómicos de la población atendida, por lo que, como se señaló en el estudio anterior, es deseable realizar estimaciones directas en las zonas de estudio.

⁵² McKinley y otros (2003).

⁵³ Se utilizaron para la actualización los factores de conversión de la Universidad de Oregon (C. Sahr, 2006).

La pérdida de productividad se calculó sobre la base de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares, y del salario mínimo general promedio nacional para 2004.⁵⁴ Se tomó en cuenta un salario mínimo de 43,30 pesos diarios y 4,48 salarios mínimos como promedio de ingreso de los hogares, por lo que un día de trabajo perdido se valoró en 194 pesos. El número de días perdidos por enfermedad fue el utilizado por ExternE, excepto para la bronquitis crónica, en cuyo caso se redujo a siete días, con base en el estudio de César y otros (2002). Se ajustó también el valor de los días perdidos por ingresos hospitalarios cardiovasculares, a la mitad de un día (87 pesos), para considerar que el grupo de riesgo es la población mayor de 65 años.

Finalmente, al no contar con estimados de VAP para efectos de morbilidad, se transfirieron de ExternE 2005, ajustando por relación de ingresos entre México y la Unión Europea.⁵⁵ El coeficiente de transferencia resultó de 0,37, considerando el producto interno bruto (PIB) en Paridad del Poder Adquisitivo reportado por el Banco Mundial⁵⁶ para 2004; se consideró una elasticidad ingreso igual a 1. En el cuadro 8 se resumen los costos utilizados para cada caso.

2. Mortalidad

Para valorar los casos de mortalidad se utilizó el Valor Estadístico de la Vida estimado para México por James Hammit (Harvard University) y María Eugenia Ibarrarán (Universidad de las Américas, Puebla) en el estudio *The Economic Value of Fatal and Non-Fatal Occupational Risks in Mexico City Using Actuarial and Perceived Risk Estimates (Estimando el valor económico de reducir los riesgos en salud en la Ciudad de México: Diferencial en compensaciones salariales)*, que fue publicado en agosto de 2006.⁵⁷ Este estudio, primero en su clase en el país, estimó el VEV para México en un rango de 235 000 y 325 000 dólares (de 2002), mediante el método de compensaciones salariales. Se considera en el estudio el valor central de 280 000 dólares (de 2002), que actualizado a 2004 es de 293 933 dólares. Con esta metodología basada en riesgos ocupacionales el VEV generalmente es un estimado bajo.

Este estimado es más bajo que el VEV que se obtiene en países desarrollados pero comparable con estudios llevados a cabo en países en desarrollo. Sin embargo, como ya se señaló, existen actualmente algunos cuestionamientos al método de compensaciones salariales, particularmente para su aplicación en medidas de control ambiental. Por ello es conveniente contar en el futuro con estudios que utilicen la técnica de valoración contingente⁵⁸ en el país, con el fin de verificar su consistencia y disponer de un estimado central más robusto. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), por ejemplo, determinó

⁵⁴ INEGI (2005).

⁵⁵ Se aclara que el estudio de McKinley presenta valores de VAP, pero los mismos corresponden a una transferencia de costos de ExternE 1999, por lo que se decidió utilizar la última actualización de ExternE 2005.

⁵⁶ Banco Mundial (2006).

⁵⁷ El estudio fue financiado por la Comisión Ambiental Metropolitana, y es parte de los trabajos que coordina el Instituto Tecnológico de Massachussets bajo el proyecto: *MIT Integrated Program on Urban, Regional and Global Air Pollution: Mexico City Case Study*.

⁵⁸ Los mismos autores realizaron un estudio aplicando la valoración contingente, cuyo resultado preliminar, aún en revisión, arrojaba un valor de 506 000 dólares; este valor fue considerado para estudios de sensibilidad en el estudio anterior de externalidades de termoelectricas.

un valor de 4,8 millones de dólares (1990) tras una revisión de 26 estudios, cinco de ellos basados en estudios de valoración contingente.

Cuadro 8
COSTOS UNITARIOS PARA CASOS DE MORBILIDAD
(Dólares de 2004)

Efecto	Costos de enfermedad a/	Pérdida de productividad b/	Voluntad a Pagar c/	Total
Bronquitis crónica	18 941	127	80 188	99 256
Ingresos hospitalarios				
Respiratorios	2 336	145	188	2 669
Cardiovasculares	11 621	73	188	11 882
Visitas a salas de urgencia respiratorias	288	91	97	476
Crisis aguda de asma	338	18	87	443
Días de actividad restringida		18	20	38

Fuente: a/ McKinley, y otros, 2003 (ajustado a dólares de 2004). b/ Se estimó un valor de 194 pesos por día laboral perdido equivalente a 18 dólares de 2004; el número de días perdidos es de 1 para las crisis agudas, 5 para visitas a salas de urgencia respiratoria y 8 para un ingreso hospitalario de acuerdo con ExternE 2005, y 7 para una bronquitis crónica de acuerdo con César y otros, 2002. c/ La VAP es transferida de ExternE 2005, con datos del Banco Mundial, World Development Indicators database, 2006.

En el cuadro 9 se presenta con fines comparativos el VEV estimado para México y los que se obtendrían de transferir el valor de otros países utilizando la relación de poder adquisitivo entre el PIB del país de referencia y México en PPP.

Con el fin de valorar la mortalidad en Años de Vida Perdidos en lugar de número de muertes, en el marco del presente estudio se determinó el Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP), con base en el VEV estimado por Hammit-Ibarrarán para México y en la metodología propuesta por Spadaro.⁵⁹ En el cuadro 10 se muestran los valores obtenidos para México, y con fines comparativos los que se obtendrían de transferir el VAVP del Proyecto ExternE. Se puede apreciar que en este caso, la transferencia de costos da valores muy cercanos a los estimados para México, los cuales se utilizaron para estimar los impactos asociados a mortalidad crónica y aguda.

⁵⁹ Spadaro (1999).

Cuadro 9

VALOR ESTADÍSTICO DE LA VIDA PARA MÉXICO (VEV)

(Dólares de 2004)

Referencia	VEV\$ ₂₀₀₄
Estimado en México a/	293 933
Transferencia de la Unión Europea b/	367 894
Transferencia de Estados Unidos c/	1 679 507

Fuente: a/ Hammit-Ibarrarán (2006); b/ ExternE 2005 transferido a México con un factor de 0,37; c/ US Environmental Protection Agency (s/f), *The Benefits and Costs of the Clean Air Act 1990 to 2010*, transferido a México con un factor de 0,24. Los factores de transferencia se calcularon con base en datos del Banco Mundial, *World Development Indicators database*. Cifras actualizadas a dólares de 2004.

Cuadro 10

VALOR DE UN AÑO DE VIDA PERDIDO PARA MÉXICO (VAVP)

(Dólares de 2004)

	Estimado propio a/	Transferido de ExternE b/
VAVP _{AGUDO}	22 917	26 228
VAVP _{CRONICO}	13 327	17 485

Fuente: a/ Estimación propia con base en la metodología de Spadaro, 1999 y al valor de Hammit-Ibarrarán, 2006; b/ ExternE 2005 transferido con un factor de 0,37 con base en datos del Banco Mundial, *World Development Indicators database*.

3. Otros impactos

Para valorar el impacto en el cambio climático se consideró el costo de reducir emisiones para México, tomando como base el potencial de reducción de emisiones (PRE) y el costo neto por tonelada de CO₂ evitada por año. La información se obtiene del documento *Hacia una estrategia nacional de acción climática*, elaborado por la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático de México y el Centro Mario Molina.⁶⁰ Se estima que en un escenario de penetración tecnológica intermedia podría tenerse un potencial de mitigación de 98,6 millones de toneladas de CO₂ al año. Los costos de reducción de los proyectos evaluados⁶¹ se estiman entre 0,66 y 274 dólares, con una media de 18 dólares por tonelada. Se tomará como referencia este valor en la determinación de externalidades, que es semejante al que considera ExternE.

⁶⁰ SEMARNAT (2006a).

⁶¹ Existen proyectos que reportan un beneficio económico en adición a la reducción de emisiones y no un costo (proyectos del tipo *no regrets*).

En el cuadro 11 se muestran las emisiones de GEI consideradas en el estudio.

Cuadro 11

ZONAS DE TULA Y SALAMANCA: EMISIONES DE CO₂
DEL SECTOR ENERGÍA

(Millones de toneladas)

	Refinación a/	Electricidad b/	Total
Salamanca	2,47	2,23	4,70
Tula	3,31	6,81	10,12
Total	5,78	9,04	14,82

Fuente: a/ PEMEX (2005a), *Informe 2004*. Desarrollo Sustentable. México.

b/ Secretaría de Energía (2004), *Emisiones Sector Eléctrico*
(www.energia.gob.mx).

El impacto en ecosistemas no fue valorado por no disponer de valores de referencia aplicables a México. La determinación del valor del Proyecto ExternE se basó en curvas de costo marginal de mitigación y niveles definidos en programas regionales europeos⁶² para protección de ecosistemas, y no puede ser aplicado al país.

⁶² Por ejemplo, la meta de reducción consideró el Protocolo de Gotemburgo sobre contaminación transfronteriza (*Protocol of Gothenburg on the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*) y la Directiva Europea 2001/81/EC (*National Emission Ceilings for some air pollutants NEC*), que define techos de emisión de contaminantes para detener la acidificación y eutrofización de ecosistemas en Europa.

III. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de la metodología para evaluar los costos externos en las zonas estudiadas. Se analizan la dispersión de los contaminantes en cada una de las zonas y las concentraciones resultantes, considerando las normas oficiales mexicanas (NOM) de la Secretaría de Salud y, finalmente, los resultados de las externalidades, desglosado por tipo de contaminante para la refinación de petróleo y para la generación de electricidad, así como en forma conjunta.

A. DISPERSIÓN Y CONCENTRACIÓN DE LOS CONTAMINANTES

1. Calidad del aire en el dominio local

Por las características del modelo utilizado (AERMOD), la modelación de cada uno de los contaminantes es independiente de los demás. El modelo permite agrupar puntos de emisión de forma, que se puede analizar en una misma corrida la contribución de cada grupo en el resultado total. Así, se definieron tres grupos de fuentes: planta termoeléctrica, quemadores de la refinería y el resto de las fuentes de la refinería; la contribución de la refinería es la suma de los resultados de estos dos últimos grupos.

De esta manera fue posible distinguir, al analizar la dispersión de los contaminantes atmosféricos, la aportación de cada una de las instalaciones (la refinería y la planta termoeléctrica) a las concentraciones totales de contaminantes estimadas tanto en la zona de Tula, como en Salamanca.

El modelo también permite evaluar la concentración promedio para cualquier período que defina el usuario. La definición se hizo con base en las normas oficiales mexicanas de la Secretaría de Salud, que establecen las concentraciones máximas de los contaminantes considerados (SO_2 , NO_x y PM_{10}) para tener una calidad del aire aceptable.

En el caso del SO_2 , la NOM-022 vigente a la fecha establece que la concentración promedio de 24 h debe ser menor de $341 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para proteger la salud de la población y el promedio anual menor de $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El NO_x se expresa como NO_2 ; respecto de las concentraciones de este contaminante, la norma oficial mexicana de salud establece un valor de $395 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio horario, valor que no debe excederse más de una vez al año; el valor guía de la EPA es de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio anual, valor que se tomó como referencia para este período.

Para el caso de PST y PM_{10} se tomaron como referencia los valores establecidos en las normas de la Secretaría de Salud, que contempla valores promedio de 24 h y de un año, vigentes a la fecha. En el cuadro 12 se muestran los valores normados en México para los contaminantes

bajo estudio, indicando en cada caso el valor límite de concentración en un tiempo promedio y la frecuencia máxima aceptable de exposición. Con el fin de analizar incidencias en las normas, se estimó la concentración promedio para estos contaminantes en los períodos de referencia y se comparó con los valores de las NOM.

En el cuadro 13 se presenta un resumen de las emisiones contaminantes consideradas para los estudios de dispersión.

Cuadro 12

MÉXICO: VALORES NORMADOS PARA CONTAMINANTES DEL AIRE

(SO₂, NO₂ y partículas)

Contaminante	Valores límite			Normas Oficiales Mexicanas
	Exposición aguda		Exposición crónica	
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	Concentración y tiempo promedio	
Bióxido de azufre (SO ₂)	0,13 ppm (341 µg/m ³) 24 horas	1 vez al año	0,03 ppm (79 µg/m ³) promedio aritmético anual	NOM-022-SSA1- 1993
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)*	0,21 ppm (395 µg/m ³) 1 hora	1 vez al año	a/	NOM-023-SSA1- 1993
Partículas suspendidas totales (PST)	210 µg/m ³ (24 horas)	2% de mediciones en un año	-	Modificación a la NOM-025-SSA1- 1993
Partículas menores de 10 micrómetros (PM ₁₀)	120 µg/m ³ (24 horas)	2% de mediciones en un año	50 µg/m ³ (promedio aritmético anual)	

Fuente: Elaboración con base en las Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Salud.

a/ Para evaluar la concentración anual de NO₂ se consideró como referencia la norma de la EPA, 100 µg/m³ o 0,053 ppm.

Cuadro 13

EMISIÓN DE CONTAMINANTES CONSIDERADOS PARA LA DISPERSIÓN

(Toneladas/año)

Zona	Refinería				Termoeléctrica	
	SO ₂	NO _x	PST	SO ₂	NO _x	PST
Tula	110 799	4 925	7 834	108 357	20 225	6 906
Salamanca	46 115	3 377	3 350	38 303	3 938	2 999

Fuente: Elaboración propia con base en datos proporcionados por PEMEX y CFE.

a) Zona de Tula

Para el caso de SO_2 , la concentración promedio anual estimada por el modelo para el dominio local sobrepasa el valor establecido por la norma de calidad del aire ($79 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en 196 receptores dentro del dominio, los cuales comprenden un área de 784 km^2 y se excede el doble de ese valor en 85 receptores (340 km^2). En algunos puntos del dominio local se tienen valores estimados de concentración promedio anual que superan en más de 10 veces el valor correspondiente a la norma de calidad del aire.

Se encuentra también que en 12 160 días-receptor se excede el promedio de 24 h que establece la citada norma de salud de $340 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y 4 100 días-receptor se ubican por encima del doble de ese valor, de $680 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

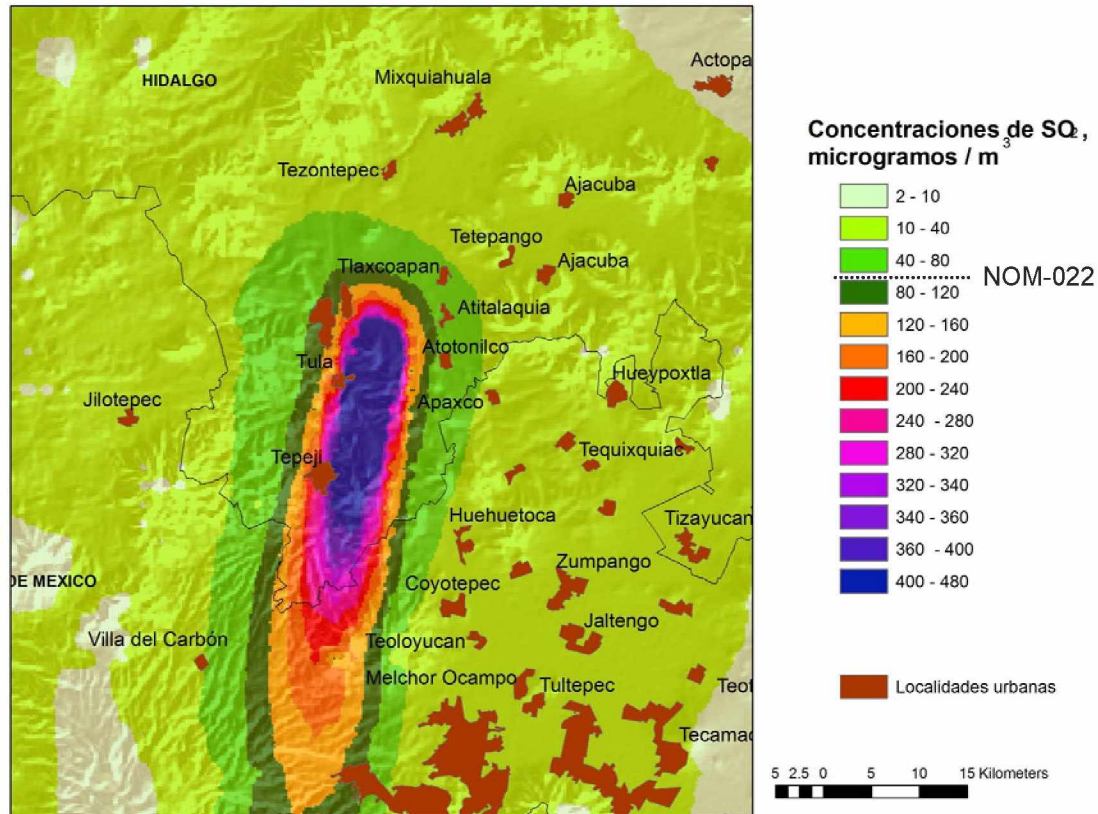
Se hizo una corrida del modelo de dispersión, extendiendo el dominio local hacia el sur en 10 km más allá de los 50 km, con el fin de tener una estimación preliminar de la influencia de las emisiones de las instalaciones evaluadas en la parte norte de la Zona Metropolitana del Valle de México. El resultado se muestra en el gráfico 6. Para una evaluación precisa en la zona ampliada, sería necesario aplicar un modelo de alcance medio, como el CALPUFF. Cabe precisar que para la determinación de las externalidades se tuvo en cuenta únicamente el dominio local regular de $100 \times 100 \text{ km}$, como establece la metodología.

Con las emisiones consideradas, las concentraciones promedio estimadas para PM_{10} y NO_2 en el dominio local están, en lo general, dentro de los valores de norma y presentan muchas menos excedencias a las normas de salud que las de SO_2 . Para PM_{10} , la concentración promedio anual estimada por el modelo rebasa la especificada por la norma de salud en sólo 4 receptores; el valor máximo estimado es mayor que el valor de referencia en un factor de 2,6. La concentración diaria estimada sobrepasa el valor de referencia (260) sólo en dos receptores en todo el dominio, por un factor de 1,7 en el caso extremo. Para el NO_2 , la concentración promedio anual supera el valor de referencia (100) sólo en cinco receptores y es dos veces mayor en un receptor.

La contribución de las emisiones de la refinería a las concentraciones de SO_2 y PM_{10} es mayor que la de la planta térmica; para los NO_x , la contribución mayor es de la planta termoeléctrica. Sin embargo, la contribución de ésta para todos los contaminantes es ligeramente menor al porcentaje esperado si sólo se consideraran sus emisiones, posiblemente debido a la mayor altura de sus chimeneas y a la influencia de otros factores como la temperatura y velocidad de los gases de escape, que facilitan la dispersión de los contaminantes.

Gráfico 6

TULA: ISOLÍNEAS DE CONCENTRACIÓN PROMEDIO ANUAL DE SO₂
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



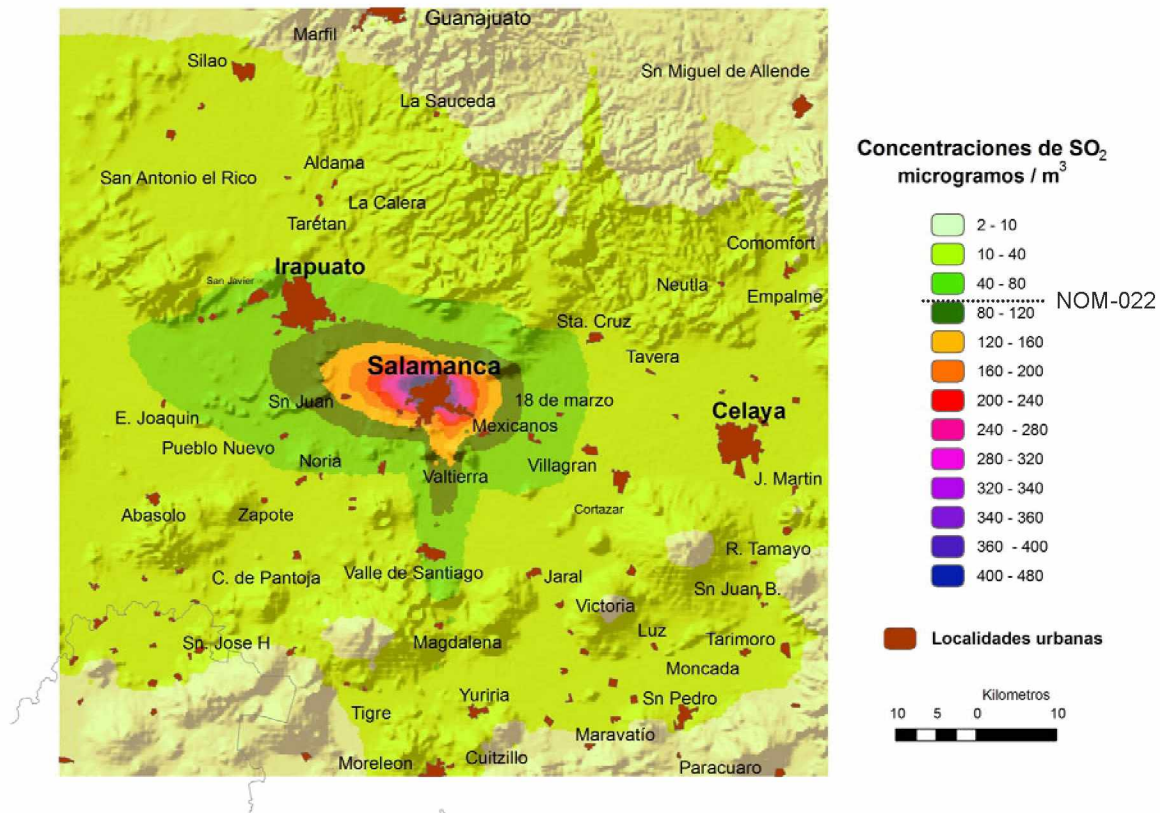
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo AERMOD.

b) Zona de Salamanca

Se modeló la dispersión local de los tres contaminantes (SO₂, NO_x y PM₁₀), considerando promedios anuales y de 24 h, al igual que para Tula. Para el SO₂, la concentración promedio anual rebasa el valor de referencia ($79 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en un total de 106 receptores de los 2 500 evaluados, que representa un área de 424 km^2 y en 29 receptores (116 km^2) se excede el doble de ese valor. En el gráfico 7 se muestran las isolíneas de concentración promedio anual estimadas.

Gráfico 7

SALAMANCA: ISOLÍNEAS DE CONCENTRACIÓN PROMEDIO ANUAL DE SO₂
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo AERMOD.

El valor máximo encontrado en algún punto del dominio excede en más de cinco veces el valor de referencia. La concentración promedio diaria estimada en todo el dominio rebasa el valor de referencia ($341 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en 87 de los 2 500 receptores al menos un día del año; sólo 1 803 valores del total de promedios diarios calculados exceden el valor de referencia, lo que representa un 0,2%. Con las emisiones consideradas, las concentraciones de NO₂ y PM₁₀ en el dominio local no presentan excedencias respecto de los valores de referencia.

2. Calidad del aire en el dominio regional

a) Definición de casos de estudio

Como se mencionó, el dominio regional evaluado fue definido como una rejilla con origen en 120 Oeste, 5 Norte, que contiene 120x60 celdas de 55x55 km. Se definieron como receptores las celdas que se encuentran en un radio de 1 500 km de la fuente evaluada, rango típico de los estudios de dispersión regional. Como resultado de la modelación, se obtienen los niveles de concentración durante el año 2004 de SO_2 , NO_x y PM_{10} , así como aerosoles de sulfato y nitrato, en cada celda definida como receptor.

Al igual que para el dominio local, se evaluó la dispersión regional de los contaminantes emitidos por cada una de las instalaciones mayores y para las dos instalaciones en su conjunto, tanto en Tula como en Salamanca. Como se mencionó, para evaluar una fuente en particular el procedimiento a seguir es correr el WMI dos veces: el “caso base”, sin tener en cuenta las emisiones de la fuente (o fuentes) que se desea estudiar, y el “caso real”, que incluye las emisiones del “caso base” más las emisiones propias de la fuente en estudio, y restar las concentraciones obtenidas para cada contaminante en el caso real respecto del caso base.

Lo anterior implicó analizar tres casos de estudio para cada zona: i) aportación de ambas fuentes en su conjunto (en el caso base la celda correspondiente a Tula no tiene emisiones de SO_2 y sólo existe una aportación de NO_x (15 000 ton/año) de otras fuentes); ii) análisis de la planta termoeléctrica; en el caso base la celda tiene las emisiones de SO_2 y NO_x de la refinería, además del NO_x de las otras fuentes, y iii) estudio de la refinería: en el caso base la celda tiene las emisiones de SO_2 y NO_x de la planta termoeléctrica, además del NO_x que se adjudica a las otras fuentes).

El caso base es muy importante en el análisis, ya que las emisiones de SO_2 , NO_x y NH_3 tienen influencia directa en las emisiones de la fuente evaluada, es decir, en el caso real. Nótese que los procesos químicos que intervienen están gobernados por ecuaciones no lineales y la velocidad de reacción para la mayoría de los casos está relacionada con las concentraciones de los reactantes que intervienen. En el caso de las partículas, el modelo no abarca las interacciones químicas sino sólo su dispersión.

En Salamanca también se corrieron tres casos (planta termoeléctrica; refinería, y ambas). Las diferencias entre los casos están dadas por las emisiones de la celda donde se ubica Salamanca. No se consideran emisiones base en dicha celda cuando se evalúan ambas instalaciones; cuando se evalúa la planta térmica, las emisiones base son las de la refinería y viceversa.

En el cuadro se 14 resumen las diferentes corridas que se hicieron del modelo, incluyendo ambos casos, el base (que incluye emisiones de NH_3 y emisiones de fondo de NO_x) y el real. También se muestran los valores máximos de incremento de la concentración estimados para los contaminantes primarios y los aerosoles de sulfatos y nitratos, y el máximo decremento de aerosoles de nitrato, identificado como “mín”.

Cuadro 14

CASOS DE ESTUDIO, DATOS DE EMISIONES Y CONCENTRACIONES OBTENIDAS

Casos de estudio	Escenario	Emisiones, t/año				Concentraciones, $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
		SO ₂	NO _x	PST	NH ₃	SO ₂	SO ₄ ²⁻	NO _x	NO ₃ ⁻	PST	
						Max	Max	Max	Min	Max	Max
1	Tula-todas	219 156	25 151	14 741	0	53,06	13,6		5,24	-0,76	0,7 3,51
1_base		0	15 000	0	9 636						
2	Tula-termo	108 358	20 225	6 906	0	26,23	6,44		4,22	-0,23	0,75 1,64
2_base		110 799	19 926	0	9 636						
3	Tula-refinería	110 799	4 926	7 834	0	26,83	6,62		1,04	-0,26	0,09 1,87
3_base		108 358	35 225	0	9 636						
4	Salamanca, todas	84 419	7 316	6 350	0	22,57	6,43		1,6	-0,05	0,67 1,68
4_base		0	0	0	6 099						
5	Salamanca, termo	38 303	3 938	2 999	0	10,24	2,86		0,87	-0,02	0,35 0,79
5_base		46 115	3 377	0	6 099						
6	Salamanca, refinería	46 115	3 377	3 350	0	12,33	3,45		0,74	-0,03	0,28 0,89
6_base		38 303	3 938	0	6 099						

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo WMI.

Como se desprende del cuadro 14, aun en el peor de los escenarios, en el caso del dominio regional no se llegan a presentar los elevados valores de concentración de los contaminantes que se encuentran en el dominio local, debido a que el modelo estima la concentración promedio en cada celda del dominio, que en este caso tiene una superficie de 3 025 km² (55*55 km), en tanto que en el dominio local se consideran celdas de 2*2 km. No obstante, los incrementos estimados de concentración de los contaminantes son muy significativos y además afectan a una gran población asentada en la gran extensión territorial que cubre el dominio regional.

Se observa una relación directa entre las emisiones de SO₂ y las concentraciones de SO₂ y SO₄²⁻, y entre las emisiones de NO_x y las concentraciones de NO_x. No se observa en lo general una relación directa entre las emisiones de NO_x y las concentraciones de NO₃⁻, las cuales dependen también de las emisiones de SO₂, tanto de la instalación que se analiza como de las emisiones base y, como se aprecia, pueden llegar a tener valores negativos.

b) Caso de estudio: emisiones de la refinería y la termoeléctrica de Tula

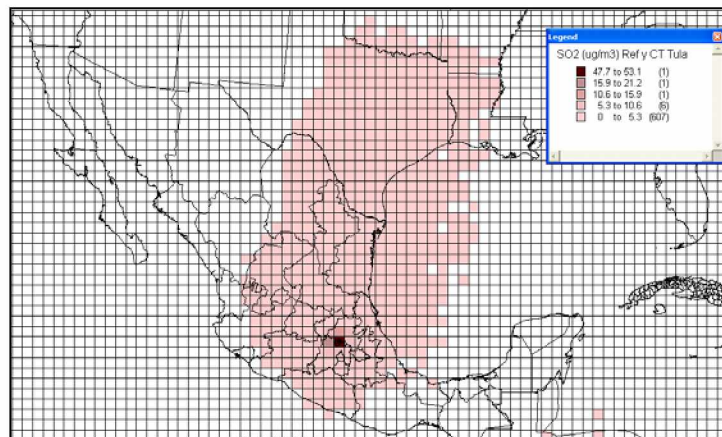
A manera de ejemplo se presentará una explicación general de los resultados obtenidos de las concentraciones al correr los modelos para el caso de Tula, con emisiones de las dos instalaciones en conjunto. Para evaluar ambas fuentes, el caso base considera en la celda de Tula emisiones de SO₂ nulas y de NO_x 15 000 t/año. Sobre esta base se añaden las emisiones totales: 219 156 t/año para SO₂, 25 151 t/año para NO_x y 14 740 t/año de PST.

En los gráficos 8 al 10 se aprecia el comportamiento de los contaminantes primarios, con concentraciones promedio anual máximas de $53,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para SO_2 , NO_x y PST, respectivamente. Se observa que en todos los casos la concentración disminuye rápidamente a la décima parte del valor máximo, en correspondencia con el comportamiento esperado para los contaminantes primarios. Las concentraciones obtenidas para SO_2 son relativamente elevadas debido a los altos niveles de emisión de este contaminante.

Gráfico 8

TULA: INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE SO_2

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

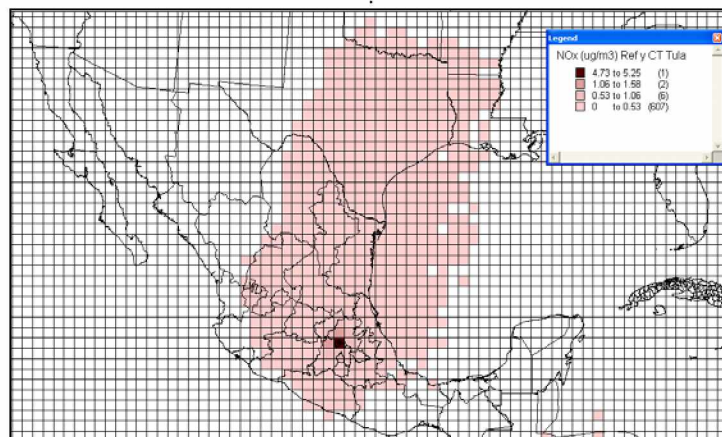


Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo WMI.

Gráfico 9

TULA: INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE NO_x

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



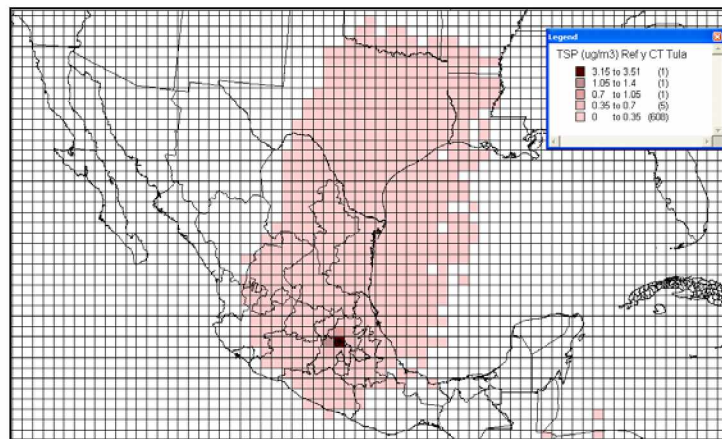
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo WMI.

En el gráfico 11 se observa el resultado de la modelación de la concentración de aerosoles de sulfato. Como se esperaba, se alcanzan incrementos importantes a mayores distancias que en el caso de los contaminantes primarios. El valor máximo alcanzado es de 13,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se aprecian otros valores elevados en un mayor número de celdas cercanas del dominio, en correspondencia con la fuerte emisión de SO_2 de las fuentes estudiadas y con las emisiones bases de NH_3 , las cuales son altas en la zona.

Gráfico 10

TULA: INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE PST

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

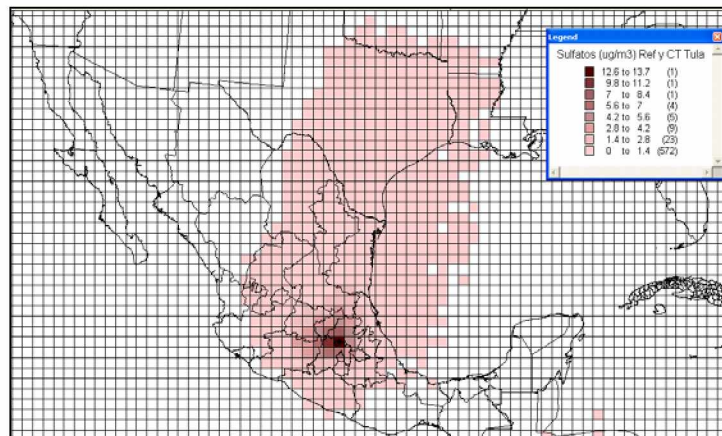


Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo WMI.

Gráfico 11

TULA: INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE SULFATOS

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



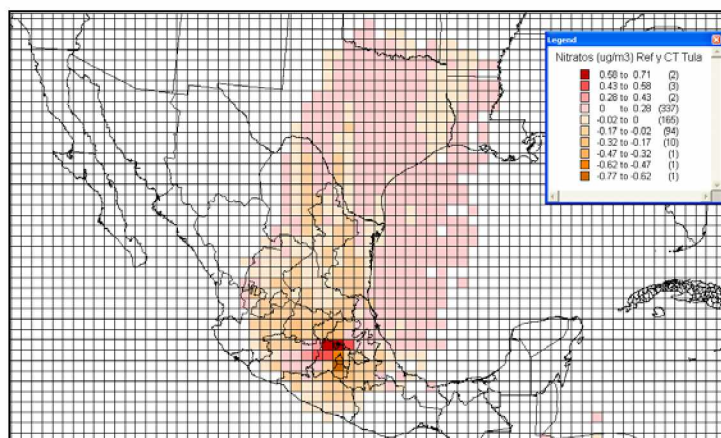
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo WMI.

En el gráfico 12 se expone la variación de la concentración de aerosoles de nitrato. En general se aprecia que los incrementos no son elevados, con un máximo de $0,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Asimismo, en un número significativo de celdas las concentraciones disminuyen, siendo el decremento máximo de $0,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este comportamiento puede explicarse de la manera siguiente: el SO_2 y el NO_x necesitan del NH_3 para la formación del $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y del NH_4NO_3 , respectivamente. La formación del $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ requiere el doble de NH_3 que la formación de NH_4NO_3 , y ambas reacciones ocurren a la misma velocidad, a iguales concentraciones de los reactantes. Como en general la concentración de NO_x es mucho menor que la de SO_2 , se favorece la formación del $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, e incluso si la emisión de SO_2 de la fuente evaluada es significativamente mayor que la de NO_x , la concentración de nitratos totales ($\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{pNO}_3$) puede disminuir respecto de la concentración obtenida en el caso base. Cabe esperar estos decrementos, especialmente cerca de la fuente donde la influencia de la concentración de SO_2 es aun más importante. En el gráfico 13 se observa el incremento de pNO_3 , especie cuya formación no depende del NH_3 en la mayor parte de las celdas, salvo por un pequeño grupo de celdas alejadas de la fuentes, donde disminuye con un mínimo de apenas $-0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Gráfico 12

TULA: VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



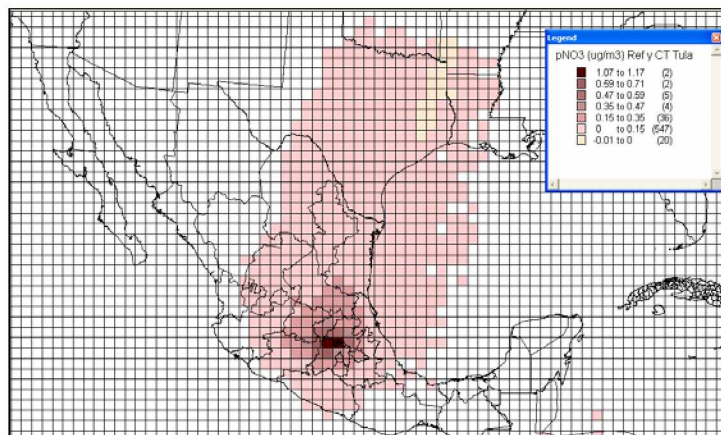
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo WMI.

3. Deposición

Los análisis realizados con los modelos AERMOD y WMI incluyen la estimación de la deposición seca y húmeda de los contaminantes primarios y secundarios. Estos parámetros son muy importantes por tener una influencia directa en los valores de concentración.

Gráfico 13

TULA: INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE pNO_3
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo WMI.

Los valores de deposición máximos estimados para el SO_2 tanto en Tula como en Salamanca están en el orden —o superan— de los establecidos en la guía de calidad de aire para Europa. En el dominio local de Tula, los valores promedio también se ubican por encima de lo establecido en dicha guía. Para el caso de NO_x los valores obtenidos de deposición se hallan por debajo de las cargas críticas propuestas para Europa.

No se han analizado estos resultados frente a los valores de carga crítica para las condiciones de México, pues sería necesario caracterizar con gran detalle los datos de uso y tipo de suelos. En general, no se conoce en qué medida los valores de carga crítica propuestos para Europa puedan aplicarse en otras regiones a raíz de que la carga crítica depende del manejo pasado y presente, del tipo de ecosistema y de las condiciones y usos del suelo. La información requerida para analizar adecuadamente los resultados y convertirlos en impactos físicos y costos externos es difícil de obtener.

B. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS EXTERNALIDADES

Siguiendo la Metodología de Vías de Impacto, a partir de los resultados de los modelos de dispersión se calculó el impacto físico en cada uno de los receptores (casos por año). Para la evaluación de los costos externos en la salud se utilizó en casos de morbilidad la suma de los costos directos de la enfermedad, la pérdida de productividad y la Voluntad a Pagar; y en los casos de mortalidad, el valor de los Años de Vida Perdidos por exposición a la contaminación atmosférica.

Las externalidades ambientales de las instalaciones del sector energía en Tula y Salamanca en 2004 se estimaron en 868 millones de dólares y 204 millones de dólares, respectivamente. Este valor corresponde exclusivamente al impacto de la emisión de

contaminantes a la atmósfera en la salud humana, sin considerar los efectos en cultivos agrícolas, ecosistemas, materiales y el calentamiento global. En el cuadro 15 se aprecian los costos externos por zona y por contaminante.

Cuadro 15

COSTOS EXTERNOS POR ZONA Y CONTAMINANTE

(Millones de dólares/año)

Zona	PM ₁₀	SO ₂	Sulfatos	Nitratos	Total costos externos
Tula	74,2	5,5	754,4	34,3	868,4
Salamanca	43,2	2,8	152,3	5,4	203,7

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo SEIA.

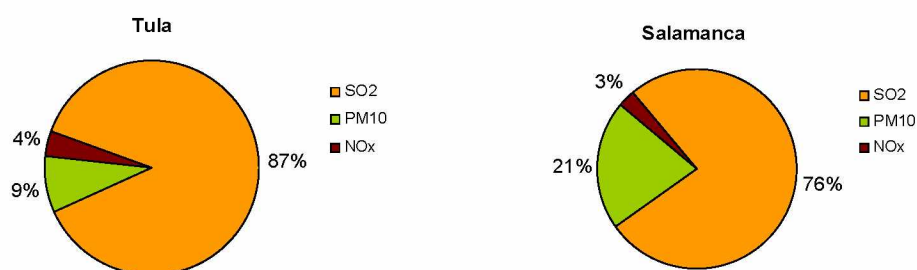
El mayor impacto de las instalaciones en Tula se explica porque tanto las emisiones como la población afectada en el dominio son mayores en esta zona. Como se ha señalado, los resultados deben interpretarse tomando en cuenta el rango de incertidumbre inherente a los modelos, por lo que el valor real puede ser de tres a cinco veces menor o mayor que el estimado.

El contaminante de mayor impacto es el SO₂, como se aprecia en el gráfico 14; su aporte como contaminante primario y como secundario en forma de sulfatos constituye 87% de los costos externos en Tula y 76% en Salamanca. En segundo lugar se encuentran las partículas finas, PM₁₀, que aportan 9% y 21% en Tula y Salamanca, respectivamente. Finalmente, los nitratos tuvieron la menor contribución, por la menor emisión de NO_x, contaminante precursor, y su inferior toxicidad. El impacto de los contaminantes secundarios es más importante que el de los primarios, alrededor de 91% y 77% del total, para Tula y Salamanca, respectivamente.

El impacto local es cercano a 4% para Tula y de 20% para Salamanca. El impacto regional (más allá de los 50 km) es el más elevado, pues los contaminantes son transportados a grandes distancias, se transforman en contaminantes secundarios, y afectan la salud de un número elevado de personas en un área de influencia mayor.

Aun cuando no se rebasen las normas de calidad del aire, el modelo reporta un impacto porque las funciones exposición–respuesta son lineales, sin umbral. El principal componente de los costos es la mortalidad crónica (por material particulado y aerosoles de sulfato y nitrato), que representa más del 60% de los costos externos en ambas zonas. En segundo lugar se cuentan los impactos por morbilidad y pérdida de productividad laboral asociada; en este caso, la contribución por bronquitis crónica y días de actividad restringida son los indicadores más importantes. En el gráfico 15 se muestra la contribución por tipo de impacto al total de las externalidades.

Gráfico 14

CONTRIBUCIÓN POR CONTAMINANTE AL TOTAL DE LAS EXTERNALIDADES

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo SEIA.

Nota: Se considera en el impacto del SO₂, la contribución de los sulfatos, y en el impacto del NO_x, la de los nitratos.

Con objeto de desglosar los costos externos por actividad económica, se corrió el modelo tratando de forma individual las emisiones de la refinación de petróleo y de la generación de electricidad. Se detecta que el modelo estima un menor impacto si las actividades se evalúan de forma separada, debido a los mecanismos de formación de contaminantes en la dispersión regional que consideran distintas emisiones de fondo en cada caso. La suma de los costos de la refinería y de la central eléctrica evaluados de forma independiente es ligeramente inferior al costo de ambas instalaciones evaluadas simultáneamente (alrededor de 4%).

Los impactos de la refinación de petróleo se muestran en el cuadro 16. La externalidad en esta actividad productiva se analizó estableciendo el volumen de proceso de crudo ⁶³ en miles de barriles de petróleo crudo diario (mbd) de las refinerías Miguel Hidalgo (Tula) e Ing. Antonio M. Amor (Salamanca) de PEMEX Refinación. En 2004 las dos refinerías procesaron aproximadamente 490 mbd; 292 mbd en Tula y 199 mbd en Salamanca. Considerando el costo externo de cada instalación, de 418,6 y 114,4 millones de dólares, respectivamente para Tula y Salamanca, se obtiene una externalidad de 3,93 dólares por barril de petróleo crudo para Tula y de 1,58 para Salamanca. Como referencia, si se fija un precio de 33 dólares por barril de petróleo crudo, ⁶⁴ la externalidad representaría 11,9% para Tula y 4,8% para Salamanca.

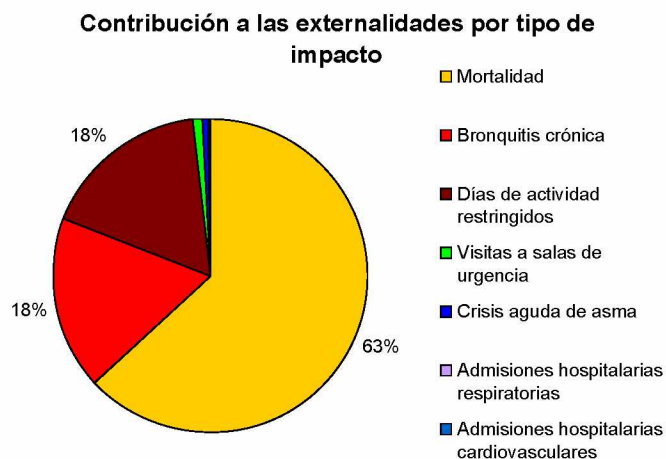
Por su parte, la generación de electricidad durante 2004 en las dos zonas representó externalidades por un valor de 402,5 y 85,9 millones de dólares en Tula y Salamanca, respectivamente. En el cuadro 17 se muestra el total del costo externo para las centrales analizadas, así como el costo por kWh generado. Si se parte de un costo de generación para las centrales termoeléctricas de vapor de 5,8 centavos de dólar por kWh, ⁶⁵ las externalidades representarían 62,6% y 46,6% del costo de generación promedio para las centrales de vapor mayores, respectivamente en Tula y Salamanca.

⁶³ PEMEX (2006).

⁶⁴ Petróleos Mexicanos, "Precio Promedio de Exportación de Petróleo Crudo" (dólares por barril)(www.pemex.com). Valor promedio de 2004.

⁶⁵ CFE (2005a).

Gráfico 15

CONTRIBUCIÓN POR TIPO DE IMPACTO AL TOTAL DE LAS EXTERNALIDADES

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo SEIA.

Cuadro 16

EXTERNALIDADES DE LA REFINACIÓN DEL PETRÓLEO

Refinería	Total costo externo (millones de dólares ₂₀₀₄)	Dólares/ barril	Proporción del precio (%)
Tula	418,6	3,93	11,9
Salamanca	114,4	1,58	4,8

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo SEIA.

Cuadro 17

EXTERNALIDADES EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

Central	Total costo externo (millones de dólares 2004)	Centavos de dólar/kWh	Proporción del costo de generación (%)
Tula	402,5	3,63	62,6
Salamanca	85,9	2,70	46,6

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo SEIA.

La contribución a las externalidades del sector refinación fue de 51% y 57%, en Tula y Salamanca, respectivamente. Sin embargo, es necesario mencionar que los análisis realizados para modelar las emisiones potenciales de los quemadores de campo, cuando las refinerías operan a bajas eficiencias de recuperación de azufre o no operan de manera adecuada las plantas recuperadoras de azufre, muestran que el impacto de las refinerías puede ser considerablemente mayor que el impacto de las termoeléctricas.

Los costos presentados incluyen únicamente el efecto de las emisiones en la salud humana, sin considerar su impacto en materiales, cultivos, ecosistemas o bosques —que generalmente son menores— o en el calentamiento global. Si se considera el impacto por cambio climático, el valor de las externalidades ambientales en las dos zonas se incrementa en 266 millones de dólares, considerando un estimado medio de 18 dólares por tonelada de CO₂ como costo de mitigación en México. El costo por emisiones de GEI se mantiene separado porque se estima por un método indirecto y no por la Metodología de Vías de Impacto.

C. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La mayor contribución a los costos externos la dan los casos de mortalidad, por lo que las variables relacionadas con su evaluación tienen una gran incidencia en los resultados. Por esta razón, se presentan en el cuadro 18 los resultados obtenidos en el caso base y los valores estimados de los costos externos, aplicando el enfoque de Valor Estadístico de la Vida para la mortalidad crónica, usando tanto el valor encontrado para México como el valor transferido del Valor Estadístico de la Vida de otros países, en este caso de Estados Unidos y de la Unión Europea, cifras que se ajustaron mediante la razón entre los PIB respectivos expresados en poder de paridad de compra.

En el primer caso, el resultado aumenta 32% para Tula y 47% para Salamanca. Como se explicó en el capítulo metodológico, existen argumentos para aplicar ambos enfoques; algunos expertos opinan que, en el caso de la mortalidad por contaminación atmosférica, el enfoque de pérdida de expectativa de vida es más adecuado; sin embargo, existen países como Estados Unidos que mantienen el enfoque de valorar cada caso de mortalidad, aplicando el Valor Estadístico de la Vida. El cuadro 18 se presenta únicamente con fines comparativos.

En el segundo caso, al aplicar la transferencia de costos de Estados Unidos y el enfoque de Valor Estadístico de la Vida, el costo externo aumenta por un factor mayor de cinco y seis veces con respecto al caso base, para Tula y Salamanca, respectivamente. Como se señaló, el VEV en México utilizado en este análisis proviene de un único estudio desarrollado mediante el método de compensaciones salariales, por lo que representa un valor bajo con respecto a estudios realizados en países en desarrollo y podría no reflejar la aversión al riesgo de toda la población. En el cuadro 18 se presenta el análisis de sensibilidad, en el que se muestra la conveniencia de desarrollar estudios de valoración contingente sobre la mortalidad, lo que posibilita hacer un comparativo con los principales estudios de referencia internacional. Muestra también que el valor estimado para las externalidades ambientales en el caso base es un valor conservador, ya que utiliza un Valor Estadístico de la Vida estimado a partir del método de compensaciones salariales.

Cuadro 18

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA EVALUACIÓN DE LA MORTALIDAD

(Millones de dólares de 2004)

	Caso base a/	Enfoque de VEV b/	VEV de EUA c/
Tula	868	1 145	4 938
Salamanca	204	300	1 341
Total	1 072	1 445	6 279

Fuente: Elaboración propia. a/ Caso base: valoración de la mortalidad utilizando el enfoque de Años de Vida Perdidos y Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP). Se calculó la pendiente de la FER en Años de Vida Perdidos con estadísticas de México y se estableció el Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP) a partir del VEV estimado por Hammit-Ibarrarán; b/ Enfoque de Valor Estadístico de la Vida: valoración de la mortalidad utilizando el enfoque de casos de muerte evitados y el Valor Estadístico de la Vida estimado por Hammit-Ibarrarán; c/ Igual que b), utilizando el VEV transferido de Estados Unidos (considerando la Paridad del Poder Adquisitivo y una elasticidad ingreso igual a 1).

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio estima, mediante la aplicación de la Metodología Vías de Impacto, los costos externos del sector energía en las zonas críticas de Tula, Hidalgo, y Salamanca, Guanajuato, en donde se encuentran instalaciones de refinación de petróleo y centrales termoeléctricas.

Las externalidades ambientales negativas del sector energía, para el año 2004, se estimaron en 868 millones y 204 millones de dólares en las zonas de Tula y Salamanca, respectivamente. El impacto más fuerte de las instalaciones en Tula se explica porque tanto las emisiones como la población afectada son mayores en esta zona.

Los costos presentados incluyen únicamente el efecto de las emisiones en la salud humana sin contemplar su impacto en materiales, cultivos, ecosistemas, o en el calentamiento global. Si se abarca el impacto por cambio climático, las externalidades ambientales se incrementan en 266 millones de dólares, según el estimado medio de costos de mitigación en México de una tonelada de CO₂.

El contaminante de mayor impacto es el SO₂; su aporte, como contaminante primario y secundario en forma de sulfatos, constituye 87% de los costos externos en Tula y 76% en Salamanca. El impacto regional (más allá de los 50 km) es mayor, pues los contaminantes son transportados a grandes distancias y afectan la salud de un número elevado de personas en un área de influencia mayor.

Considerando el costo externo de cada refinería, de 418,6 millones y 114,4 millones de dólares, respectivamente, se obtiene una externalidad de 3,93 dólares por barril de petróleo crudo procesado para Tula y de 1,58 dólares para Salamanca. Como referencia, si se considera un precio internacional de 33 dólares por barril de petróleo crudo, la externalidad representaría 11,9% y 4,8%, respectivamente, para Tula y Salamanca.

Para la generación de electricidad en las dos zonas durante el año 2004, se estimó un costo externo de 402,5 millones y 85,9 millones de dólares para Tula y Salamanca, respectivamente. La externalidad equivale a 3,63 y 2,70 centavos de dólar por kWh generado, para Tula y Salamanca; si se considera un valor de referencia de 5,8 centavos de dólar por kWh, como costo de producción en las centrales termoeléctricas de vapor, los costos por externalidades representarían 62,6% y 46,6% del costo de generación, respectivamente. Estos resultados son consistentes con la estimación de externalidades de la generación de electricidad en el principal estudio de referencia de Europa, el Proyecto ExternE.

Los resultados deben interpretarse tomando en cuenta el rango de incertidumbre considerado en el modelo, lo que implica que el valor real podría ser de tres a cinco veces menor o mayor que el estimado.

A pesar de las incertidumbres inherentes a este tipo de análisis, en el presente estudio se realizaron avances metodológicos que permitieron una mejor simulación de fuentes fijas de

emisión. Los modelos de dispersión utilizados proporcionaron información más detallada que la del estudio previo sobre los niveles de concentración de contaminantes, tanto en el dominio local como regional. Los promedios anuales de concentración estimados de PM_{10} y NO_x se ubican en lo general dentro de los límites fijados por las normas oficiales mexicanas de la Secretaría de Salud, vigentes a la fecha. Sin embargo, para el caso del SO_2 , en ambas zonas se encuentran fuera de los límites causando incidencias importantes a la salud.

La concentración estimada de SO_2 excede el valor normado en el aire ambiente que establece la NOM-022-SSA1-1993, como medida de protección a la salud de la población. La concentración promedio anual supera el valor de referencia $79 \mu g/m^3$ en un área de $784 km^2$ en el caso de Tula y de $424 km^2$ en Salamanca, y es mayor del doble en un área importante en ambas zonas. En algunos puntos del dominio local en Tula los valores estimados de concentración promedio anual sobrepasan en más de 10 veces la norma. El parámetro de concentración máxima promedio de 24 horas ($340 \mu g/m^3$) se rebasa también varios días en ciertos receptores.

Los modelos de dispersión utilizados requieren ser calibrados y verificados en campo, utilizando mediciones de estaciones de monitoreo de la calidad del aire. En Salamanca, por ejemplo, la red de monitoreo local confirma que en una de las estaciones se excedió la norma de concentración promedio anual para el 2004. En Tula, es necesario recopilar información sistematizada de la calidad del aire.

Los resultados obtenidos, tanto del costo en salud como de los valores estimados de concentración de contaminantes superiores a los permitidos, ratifican la necesidad de realizar acciones para controlar las emisiones. Los primeros resultados indujeron a la SEMARNAT a expedir una Norma Oficial Mexicana de Emergencia (NOM-EM-148), en abril de 2006, para reducir las emisiones de SO_2 de las refinerías de Tula y Salamanca, mediante el proceso de recuperación de azufre. Esta norma está en proceso de expedirse como norma definitiva, extendiendo su campo de aplicación a todo el Sistema Nacional de Refinación.

Por lo que hace a las emisiones de los procesos de combustión del sector eléctrico, su reducción requiere de acciones firmes del sector energía para incluir el uso de tecnologías de control de emisiones, en los casos en que no se pueda disponer de combustibles limpios. El presente estudio ratifica que los beneficios ambientales que se obtendrían de la reducción de emisiones son contundentes.

Sin duda alguna, la producción de energía es factor esencial del desarrollo y genera también externalidades positivas; su producción y consumo son indispensables para el crecimiento de México. Se espera que el estudio proporcione las bases para inducir a los agentes económicos a reorientar sus procesos y tecnologías a la protección del ambiente y al desarrollo sustentable, considerando los costos del impacto ambiental que ocasionan.

ACRÓNIMOS

AERMOD	American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model
AVP	Años de Vida Perdidos
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe de la Organización de Naciones Unidas.
CFE	Comisión Federal de Electricidad
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)
FUND	Climate Framework for Uncertainly Negotiation and Distribution
GPCC	Global Precipitation Climatology Center
IMSS	Instituto Mexicano del Seguro Social
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
INSP	Instituto Nacional de Salud Pública
IRR	Incremento de Riesgo Relativo
ISCST3	Industrial Source Complex Short-Term 3 (Modelo de dispersión a escala local para instalaciones industriales)
LFC	Luz y Fuerza del Centro
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PPP	Paridad del Poder Adquisitivo
SEIA	Sistema de Evaluación del Impacto Ambiental de Instalaciones Energéticas
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
SIG	Sistema de información geográfica
SIMPACTS	Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation (Modelo simplificado para estimar el Impacto de la Generación de Electricidad)
SINAIS	Sistema Nacional de Información en Salud
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
UWM	Uniform World Model (Modelo simplificado para estimar externalidades)
VAVP	Valor de un Año de Vida Perdido
VEV	Valor Estadístico de la Vida
WTM	Windrose Trajectory Model (Modelo de dispersión de contaminantes a escala regional)

BIBLIOGRAFÍA

Banco Mundial (2006), *World Development Indicators Database*.

Beth, Anne y Brad Bass (2005), “Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE Model”, 6th Biennial CANSEE (Canadian Society for Ecological Economics), conferencia, Toronto, 27 a 29 de octubre.

Boerboom, A. J. H. y G. Kleyn (1969), “Diffusion coefficients of noble gases in water”, *J. Chem. Phys.*, vol. 50, pp. 1086-1088.

Carmichael, G. R. y otros (2001), “Model intercomparison study of long range transport and sulfur deposition in East Asia (MICSASIA)”, *Water Air & Soil Pollution*.

César, H. y otros (2002), *Improving Air Quality in Metropolitan Mexico City Economic Valuation*, Banco Mundial, Working Paper 2785.

CFE (Comisión Federal de Electricidad) (2005a), *Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión del sector eléctrico*, México.

_____ (2005b), *Informe de operación 2004*, México.

Cimorelli, A. y otros (2005), “AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part I: General model formulation and boundary layer characterization”, *Journal of Applied Meteorology*, 44(5): 682–693.

Derwent, R. G. y otros (1989), “An intercomparison of long-term atmospheric transport models: the budgets of acidifying species for the Netherlands”, *Atmospheric Environment*, vol. 23, N° 9, pp. 1893-1909.

Derwent, R. G. y K. Nodop (1986), “Long-range transport and deposition of acidic nitrogen species in north-west Europe”, *Nature*, vol. 324, noviembre, pp. 356-358.

European Commission, ExternE (2005), *Externalities of Energy: Methodology 2005 Update* (EUR 21951), Directorate-General XII, Science Research and Development, Office for Official Publications of the European Communities, L-2920, Luxembourg, F75272, París, Cedex 06, Francia, pp. 83-85 y 181-188.

Hammit, J. y M. Ibararán (2006), *The Economic Value of Fatal and Non-Fatal Occupational Risks in Mexico City Using Actuarial - and Perceived - Risk Estimates*, México.

IAEA (International Atomic Energy Agency (2002), *AIRPACTS equations for impact and damage cost assessments*. Addendum to the AirPacts manual.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2006), *Población total por grupos quinquenales de edad según sexo, 1950 a 2005*, México.
- ____ (2005), *Salario mínimo general promedio de los Estados Unidos Mexicanos*, Comisión Nacional de Salarios Mínimos y Distribución porcentual de los hogares por sexo del jefe y rangos de salarios mínimos equivalentes, 1992 a 2004, México.
- ____ (2003a), *Continuo de elevaciones mexicano (CEM) escala 1:50,000*, México.
- ____ (2003b), *Uso del suelo y vegetación, Serie 3*, México.
- ____ (2000), *Marco geoestadístico municipal 2000*, México.
- INEGI/Secretaría de Salud (2005), *Base de datos de defunciones 2004*.
- Leksell y Rabl (2001), “Air pollution and mortality: Quantification and valuation of years of life lost”, *Risk Analysis*, vol. 1, N° 5.
- Logan, J. A. (1999), “An analysis of ozones onde data for the troposphere: Recommendations for testing 3-D models and development of a gridded climatology for tropospheric ozone”, *Journal of Geophysical Research - Atmospheres* 104(D13): 16115-16149.
- McKinley, G. y otros (2003), *The Local Benefits of Global Air Pollution Control in Mexico City*, Instituto Nacional de Ecología, México [en línea] (www.ine.gob.mx).
- Metcalf, S. E. y otros (1989), “Acid deposition modeling and the interpretation of the United Kingdom secondary precipitation network data”, *Atmospheric Environment*, vol. 23, N° 9, pp. 2033-2052
- OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) (2003), *SIMPACTS: Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation*, Multilanguage version.
- ____ (2002a), *AIRPACTS equations for impact and damage cost assessments*, Addendum to the AirPacts manual.
- ____ (2002b), *AIRPACTS Manual, (Version 1.0), A tool for assessing the environmental impacts and damage costs to human health, agricultural crops and man-made structures from exposure to routine atmospheric emissions*.
- OMS (Organización Mundial de la Salud) (2000), “Air quality guidelines for Europe”, Regional Office for Europe, Copenague, WHO Regional Publications, *European Series, N° 91*, segunda edición.
- Paine, R. J. y otros (1998), “Evaluation Results for AERMOD”, *Draft Report, Docket N° A-99-05, II-A- 05* [en línea] (www.epa.gov./scram001/).

Patronato para el Monitoreo de la Calidad del Aire de Salamanca, A. C. (2004), “Datos de calidad del aire y parámetros meteorológicos de las estaciones de la red”, México (Disco de datos enviado a SEMARNAT).

PEMEX (Petróleos Mexicanos) (2006), *Anuario estadístico 2005*, México.

_____ (2005a), *Informe 2004, desarrollo sustentable*, México.

_____ (2005b), *Anuario estadístico 2004*, México.

PEMEX Refinación (2006), “Reporte en línea de emisiones contaminantes al aire”, SISPA, México.

Perry, S. y otros (2005), “AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part II: Model performance against 17 field study databases”, *Journal of Applied Meteorology*, 44(5), pp. 694–708.

Rabl A. y J. V. Spadaro (1999), *An Analysis of the Uncertainties of Damages and Costs of Air Pollution*, Centre d’Energétique, École des Mines, París, Francia.

Sahr, Robert C. (2006), *Consumer Price Index (CPI), Conversion Factors 1800 to estimated 2016 to Convert to Dollars of 2000*, Oregon State University.

Sander, Rolf (1999), *Compilation of Henry’s Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry*, Air Chemistry Department, Max-Planck Institute of Chemistry [en línea] (<http://www.mpch-mainz.mpg.de/sander/res/henry.html>), febrero.

Scire, J. S., D. G. Strimaitis y R. J. Yamartino (2000), *A User’s Guide for the CALPUFF Dispersion Model* (Version 5.0), Earth Tech, Inc., Concord, MA.

SENER (Secretaría de Energía) (2005a), *Emisiones sector eléctrico por central 2004* [en línea] (www.sener.gob.mx), México.

_____ (2005b), *Generación bruta de energía eléctrica*, [en línea] (www.sener.gob.mx), México.

_____ (2004), *Emisiones del sector eléctrico nacional* [en línea] (www.sener.gob.mx), México.

_____ (s/f), *Elaboración de productos petrolíferos por refinería*, Sistema de Información Energética con información de Petróleos Mexicanos, período 1 de enero a 31 de diciembre de 2004 [en línea] (www.sener.gob.mx), México.

Secretaría de Salud/Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS) (2005a), *Sistemas automatizados de egresos hospitalarios*, México.

_____ (2005b), *Mortalidad 2004*, México.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2006a), *Hacia una estrategia nacional de acción climática*, México.

_____ (2006b), *Inventario nacional de emisiones*, México.

_____ (2005), *Cédulas de operación anual del 2004 de las refinerías de petróleo y centrales eléctricas*, México.

SEMARNAT/CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2004), *Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México* (LC/MEX/L. 644), México, 22 de noviembre.

Servicio Meteorológico Nacional (2005a), *Datos de la red de radiosondeos. Estación 76679*, datos del 2004, México.

_____ (2005b), *Datos meteorológicos de las estaciones meteorológicas automáticas con transmisión vía satélite, Estaciones 2389, 2320, 2350, 1915, 2080, 2423 y 2364*, datos del 2004, México.

_____ (2005c), *Datos de estaciones climatológicas, datos del 2004, Archivo comprimido en relación a la solicitud de información climatológica de datos diarios representativos para Tula, Hidalgo y Salamanca, Guanajuato*, México.

Spadaro, Joseph V. (2006), "Methodology for CRF and VOLY estimates for Mexico", comunicación personal por correo electrónico, 11 de septiembre.

_____ (1999), *Quantifying the Impacts of Air Pollution*, Centre d'Energétique, École de Mines, París.

Spivakovsky, C. M. y otros (2000), "Three-dimensional climatological distribution of tropospheric OH: update and evaluation", *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 105(D7): 8931-8980.

Spix, C. y otros (1998), *Short Term Effects of Air Pollution on Hospital Admissions for Respiratory Diseases in Europe: a Quantitative Summary of APHEA Study Results*, Archives of Environmental Health.

Stieb, D. M., S. Judek y R. T. Burnett (2002), *Meta-analysis of Time-Series Studies of Air Pollution and Mortality: Effects of Gases and Particles and the Influence of Cause of Death, Age, and Season*, Air Waste Management Association.

Trukenmüller, A., C. Klamt y W. Krewitt (2001), *Revision of WTM Parameters for EcoSense China*, Stuttgart, Stuttgart University, IER.

Trukenmüller, A. y R. Friedrich (1995), *Die Abbildung der großräumigen Verteilung, chemischen Umwandlung und Deposition von Luftschadstoffen mit dem Trajektorienmodell WTM*, in *Jahresbericht ALS 1995*, Stuttgart, p. 93-108.

USEPA (United States Environmental Protection Agency) (2005), 40 CFR Part 51 [AH-FRL-7990-9] RIN 2060-AK60, “Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions”, Federal Register, vol. 70, N° 216, Rules and Regulations, 9 de noviembre.

_____ (2004a), “User’s Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET)”, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711, 03-002, noviembre.

_____ (2004b), 454/B-03-001 “User's Guide For The AMS/EPA Regulatory Model – AERMOD”, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711, septiembre.

_____ (2004c), “User's Guide for the AERMOD Terrain Preprocessor (AERMAP)”, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711.

_____ (2002), “Compendium of reports from the Peer Review Process for AERMOD” [en línea] (www.epa.gov/scram001), febrero.

_____ (1998), “User's Guide for the AERMOD Terrain Preprocessor (AERMAP)”, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711.

_____ (s/f), *The Benefits and Costs of the Clean Air Act 1990 to 2010*.



Distr.
LIMITADA

LC/MEX/L.788/Rev.1
11 de septiembre de 2007

ORIGINAL: ESPAÑOL

EVALUACIÓN DE EXTERNALIDADES AMBIENTALES DEL SECTOR ENERGÍA EN LAS ZONAS CRÍTICAS DE TULA Y SALAMANCA

Este documento fue realizado en el marco de un Convenio de Colaboración entre la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (SEMARNAT) y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) de la Organización de Naciones Unidas (ONU). Participaron la Dirección General de Energía y Actividades Extractivas de la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de la SEMARNAT y la Unidad de Energía y Recursos Naturales de la Sede Subregional de la CEPAL en México. Las opiniones expresadas en este documento son de la exclusiva responsabilidad de los especialistas que participaron en su elaboración y pueden no coincidir con las de la Organización.

ÍNDICE

	<u>Página</u>
RESUMEN	1
PRESENTACIÓN.....	5
I. ASPECTOS METODOLÓGICOS	7
A. METODOLOGÍA DE VÍAS DE IMPACTO	8
1. Caracterización de las fuentes emisoras	9
2. Dispersión de contaminantes atmosféricos.....	10
3. Evaluación de impactos	13
4. Evaluación monetaria	16
B. NUEVO PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LAS EXTERNALIDADES	18
C. INCERTIDUMBRE	19
II. INFORMACIÓN PARA LOS MODELOS UTILIZADOS	21
A. INSTALACIONES DEL SECTOR ENERGÍA.....	21
1. Selección de las fuentes fijas de emisión.....	21
2. Datos técnicos de las fuentes seleccionadas	23
3. Dominio local de modelación	25
4. Dominio regional de modelación.....	27
B. DATOS METEOROLÓGICOS	28
1. Datos meteorológicos para la dispersión local	28
2. Datos para dispersión regional.....	29
C. INVENTARIO DE EMISIONES DE MÉXICO.....	31
D. FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA CONSIDERADAS	32
1. Tasas de incremento de riesgo relativo.....	33
2. Tasas de incidencia y de mortalidad	33
3. Funciones exposición-respuesta para mortalidad estimadas con el enfoque de pérdida de expectativa de vida	34

	<u>Página</u>
4. Resumen de funciones exposición-respuesta aplicadas en el estudio	36
E. COSTOS ECONÓMICOS	37
1. Morbilidad	37
2. Mortalidad.....	38
3. Otros impactos	40
III. RESULTADOS	42
A. DISPERSIÓN Y CONCENTRACIÓN DE LOS CONTAMINANTES.....	42
1. Calidad del aire en el dominio local	42
2. Calidad del aire en el dominio regional	47
3. Deposición	51
B. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS EXTERNALIDADES	52
C. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	56
IV. CONCLUSIONES	58
ACRÓNIMOS	61
BIBLIOGRAFÍA	63

RESUMEN

El propósito de este trabajo es estimar las externalidades del sector energía con base en la concentración estimada de los contaminantes, en dos zonas de la República Mexicana consideradas críticas desde el punto de vista ambiental: Tula, en el estado de Hidalgo, y Salamanca, en el estado de Guanajuato. En ambas zonas se cuenta con una central termoeléctrica y una refinería de petróleo.

A fin de evaluar dichas externalidades, se utilizó la Metodología de Vías de Impacto, pero con programas computacionales diferentes respecto de estudios previos. Estos modelos brindan una mayor capacidad de simulación, así como una mejorada flexibilidad en las opciones ofrecidas. Las principales mejoras fueron las siguientes: 1) uso del sistema de modelos AERMOD de la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos, para simular la dispersión local; 2) uso del modelo Windrose Model Interpreter (WMI) para la modelación del dominio regional; 3) utilización de una base de datos de la CEPAL con información regional de meteorología y de contaminantes, que cubre la zona de México, Centroamérica y el Caribe; 4) un conjunto actualizado de funciones exposición-respuesta para estimar los impactos en la salud humana; 5) la aplicación de la metodología de pérdida de expectativa de vida en México para evaluar el impacto de la mortalidad y para su valoración económica, y 6) uso de un nuevo programa computacional que implementa las mejoras mencionadas.

La aplicación de la metodología seleccionada requirió disponer de una serie de datos técnicos, económicos y de salud, por lo que fue necesario adoptar el año 2004, sobre el cual existía dicha información. Se obtuvo información geográfica y meteorológica de las dos zonas críticas estudiadas, así como de las características técnicas de las plantas termoeléctricas y las refinerías, incluyendo el inventario de los contaminantes emitidos. El análisis se limitó a considerar las emisiones de partículas de bióxido de azufre (SO_2) y de óxido de nitrógeno (NO_x), sin abarcar las emisiones “corriente arriba”. Se incluyó una estimación del costo asociado a la emisión de gases de efecto invernadero.

Para estimar el impacto en la salud se utilizaron dos meta-análisis y un estudio independiente. El primero de ellos es el meta-análisis realizado en el marco del proyecto Ecosistema Urbano y Salud de los Habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México. El segundo meta-análisis, elaborado por Stieb y otros (2002), se utilizó en la obtención del IRR para evaluar la mortalidad aguda por SO_2 . Para el caso de las admisiones hospitalarias por SO_2 , se ocupó un estudio independiente (Spix y otros, 1998), al no contar con un meta-análisis. En el marco de este estudio se aplicó por primera vez en México la metodología propuesta por Leskell y Rabl en Europa para la estimación de las pendientes exposición-respuesta asociadas a la mortalidad en Años de Vida Perdidos (AVP).

Se actualizó también la información sobre costos de morbilidad y mortalidad. El costo directo de enfermedad utilizado corresponde al nivel III de atención (el más completo) del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), estimado por el Instituto Nacional de Ecología y el

Instituto Nacional de Salud Pública. La pérdida de productividad se calculó considerando la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares y el salario mínimo general promedio nacional para 2004. Finalmente, al no contar con estimados de Voluntad a Pagar para efectos de morbilidad, se transfirieron los valores de ExternE (2005) ajustando por relación de ingresos entre México y la Unión Europea.

Para valorar la mortalidad se utilizó el Valor Estadístico de la Vida (VEV) estimado para México por Hammit e Ibarrarán, en un documento publicado en agosto de 2006, y con dicho valor se determinó el Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP) con la metodología propuesta por Spadaro.

La concentración estimada para SO_2 en el dominio local excede el valor establecido por la norma de calidad del aire en un número alto de receptores en ambas zonas. Por su parte, las concentraciones promedio estimadas para PM_{10} y NO_x en el dominio local se ubican, en lo general, dentro de la norma de salud de referencia.

Las externalidades ambientales del sector energía, para el año 2004, se estimaron en 868 y 204 millones de dólares en las zonas de Tula y Salamanca, respectivamente. Estos costos incluyen únicamente el efecto de las emisiones en la salud humana sin considerar su impacto en materiales, cultivos, ecosistemas, o en el calentamiento global. Si se considera el impacto por cambio climático, las externalidades ambientales se incrementan en 266 millones de dólares, considerando el estimado medio de costos de mitigación en México, de 18 dólares por tonelada de dióxido de carbono (CO_2).

El contaminante de mayor impacto es el SO_2 ; su aporte, como contaminante primario y secundario en forma de sulfatos, constituye 87% de los costos externos en Tula y 76% en Salamanca. El impacto regional (más allá de los 50 km) es mayor, pues los contaminantes son transportados a grandes distancias y afectan la salud de un número elevado de personas en una amplia área de influencia.

Considerando el costo externo de cada refinería, de 418,6 y 114,4 millones de dólares, respectivamente, se obtiene una externalidad de 3,93 dólares por barril de petróleo crudo procesado para Tula y de 1,58 dólares para Salamanca. Como referencia, si se considera un precio internacional de 33 dólares por barril de petróleo crudo, la externalidad representaría 11,9% y 4,8%, respectivamente, para Tula y Salamanca.

Para la generación de electricidad en las dos zonas, durante 2004 se estimó un costo externo de 402,5 millones y 85,9 millones de dólares para Tula y Salamanca, respectivamente. La externalidad es de 3,63 y 2,70 centavos de dólar por kWh generado, para Tula y Salamanca; si se considera un valor de referencia de 5,8 centavos de dólar por kWh, como costo de producción en las centrales termoeléctricas de vapor, los costos externos representarían 62,6% y 46,6% del costo de generación. Estos resultados son consistentes con la estimación de externalidades de la generación de electricidad en el principal estudio de referencia de Europa, el proyecto ExternE.

La estimación de los costos externos conlleva un nivel de incertidumbre alto, a causa de la cantidad de variables involucradas y a los diferentes supuestos, particularmente con respecto a los efectos de los contaminantes en la salud y a los costos para la valoración. Los resultados deben

interpretarse tomando en cuenta el rango de incertidumbre de la metodología, lo que implica que el valor real podría ser menor o mayor que el estimado. A pesar de las incertidumbres asociadas en la valoración de externalidades, el presente estudio ratifica que los beneficios ambientales que se obtendrían de la reducción de emisiones son contundentes.

PRESENTACIÓN

La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), de México, identifica la “valoración de los recursos naturales” como uno de los pilares de la política ambiental y establece entre sus objetivos estratégicos el detener su avance e invertir el sentido tanto de la contaminación como de la degradación de los recursos. La valoración de las externalidades ambientales de la producción de energía es necesaria para formular y aplicar la política ambiental y alcanzar dichos objetivos. Las externalidades negativas representan costos y beneficios no incorporados a los precios de mercado que distorsionan las decisiones económicas.

La producción y el consumo de energía conllevan impactos locales, regionales y globales sobre el medio ambiente; sus emisiones constituyen la principal fuente de contaminación del aire en el país y de emisión de gases de efecto invernadero. La regulación de sus efectos se basa en la definición de niveles máximos permisibles de emisión, que consideren los costos ambientales y fomenten la aplicación de tecnologías que reduzcan las emisiones. La elaboración y revisión de normas oficiales mexicanas (NOM) para regular los procesos del sector energía requiere, por lo tanto, evaluar la calidad del aire en las zonas aledañas a sus instalaciones, así como valorar los costos externos de la contaminación.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar las externalidades del sector energía con base en la concentración estimada de los contaminantes que se emiten en dos zonas críticas: Tula, en el estado de Hidalgo y Salamanca, en el estado de Guanajuato. En ambas zonas se cuenta con una planta de refinación de petróleo y otra de generación de electricidad. El conocimiento de los costos externos de sus impactos dará bases a la secretaría para formular un conjunto de disposiciones que coadyuven a su mitigación.

El informe comprende cuatro capítulos. En el primero se expone la metodología aplicada para evaluar las externalidades ambientales en cada uno de los dos sitios. En el segundo se analiza la información utilizada, correspondiente al año 2004, de carácter técnico, ambiental y económico, así como de salud. En el capítulo III se presentan los resultados de los niveles de concentración de contaminantes, tanto en el dominio local como regional, sus efectos en la salud, y la estimación del costo de los daños, denominados costos externos o externalidades. Las conclusiones se exponen en el capítulo IV.

El estudio se complementa con el que se publicó en 2004, con el título “Evaluación de externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México”, en el cual se evaluaron las externalidades de las mayores plantas termoeléctricas del país, empleando metodologías simplificadas propuestas por el Organismo Internacional de Energía Atómica. Entre las conclusiones de dicho estudio se planteó la necesidad de abarcar las emisiones de otras grandes instalaciones, en particular las refinerías de petróleo, a fin de estimar los niveles de contaminación en las zonas críticas.

En el presente estudio se implementaron modelos detallados para simular la dispersión de contaminantes a nivel local y regional. Su aplicación en el país, por primera vez en América Latina, fue posible gracias al esfuerzo de expertos internacionales, coordinados por la CEPAL, para actualizar las bases de datos necesarias y para realizar las adecuaciones a México de los programas de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos y de la Unión Europea.

Su elaboración estuvo a cargo de un grupo interdisciplinario constituido por funcionarios de la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental de la SEMARNAT y de la Sede Subregional de la CEPAL en México. Por lo que se refiere a la Subsecretaría, los integrantes fueron Ramón Carlos Torres, Director General de Energía y Actividades Extractivas; Carlos García-Moreno, Director de Emisiones a la Atmósfera, y Claudia Octaviano, Subdirectora de Refinación y Electricidad. Por parte de la CEPAL participaron Fernando Cuevas, Jefe de la Unidad de Energía y Recursos Naturales; Manuel Eugenio Rojas, Asistente de Investigación, así como las consultoras Leonor Turtos, Madeleine Sánchez y Elieza Meneses. Juan Carlos Moreno-Brid, Coordinador de Investigación de la CEPAL, revisó el informe y aportó comentarios importantes.

La realización de este estudio requirió de un esfuerzo conjunto de varias instituciones que aportaron valiosa información, conceptos, recomendaciones y sugerencias. Se extiende un reconocimiento por sus valiosas contribuciones a la Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico de la Secretaría de Energía, a la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios de la Secretaría de Salud, a la Dirección de Operación de la Comisión Federal de Electricidad y a PEMEX Refinación; al Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua por sus recomendaciones para el uso de la información meteorológica; y a las áreas de SEMARNAT que colaboraron en su realización: Dirección General de Estadística e Información Ambiental, Gestión de la Calidad del Aire y RETC e Investigación de la Contaminación Urbana y Regional, esta última adscrita al Instituto Nacional de Ecología.

Las opiniones contenidas en el estudio son de la responsabilidad de los especialistas que participaron en su elaboración y pueden no coincidir con las de las instituciones involucradas.

Jorge Máttar
Oficial a cargo de la Sede Subregional de la
CEPAL en México
NACIONES UNIDAS

Ing. Sandra Denisse Herrera Flores
Subsecretaria de Fomento y Normatividad
Ambiental
SEMARNAT

I. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Las externalidades representan costos y beneficios no incorporados a los precios de mercado, y que por tanto distorsionan las decisiones económicas óptimas. En el sector energético, la actividad de refinación de petróleo, así como la producción de electricidad con base en combustibles fósiles, generan diferentes impactos. Entre éstos se puede mencionar, a nivel local, la contaminación de áreas urbano-industriales; a nivel regional, la lluvia o deposición ácida, y a nivel global, el cambio climático. El valor de estos efectos de la actividad energética no se incorpora al precio del bien producido.

La valoración de las externalidades se realiza mediante diferentes metodologías, incluso algunas que aplican sólo un tratamiento cualitativo. La metodología más aceptada es la de “Vías de Impacto”, utilizada por la Unión Europea en su proyecto ExternE. Se han desarrollado diferentes modelos computacionales para su aplicación, algunos muy detallados con altos requerimientos de información, otros más simplificados que emplean menos información y recurren a una serie de aproximaciones para las diversas estimaciones. Entre estos últimos se cuenta el modelo SIMPACTS ¹ del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Dicho modelo simplificado se utilizó en el estudio previo ya mencionado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) de México y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). ² En dicho documento se expone de manera detallada la Metodología de Vías de Impacto, así como los supuestos y aproximaciones que utiliza el modelo SIMPACTS para obtener una evaluación de externalidades.

En el presente trabajo se emplearon modelos más detallados para el análisis de la dispersión de contaminantes con el fin de evaluar su concentración en la zona de influencia y se utilizó información real sobre la distribución de la población en el dominio regional.

La selección de un modelo simplificado o de modelos más detallados depende del alcance del estudio que se pretende realizar. La primera evaluación de externalidades mencionada anteriormente se realizó con el modelo simplificado, considerando un número amplio de fuentes y zonas de estudio. Derivado de esos análisis, se decidió aplicar en el presente caso modelos detallados de dispersión en dos zonas críticas.

¹ OIEA, 2003, SIMPACTS.

² Disponible en la página web de la SEMARNAT (www.semarnat.gob.mx).

A. METODOLOGÍA DE VÍAS DE IMPACTO

En el presente estudio se utilizó también la Metodología de Vías de Impacto que comprende las cuatro etapas (véase el gráfico 1) que se exponen a continuación.

1) Caracterización de la fuente emisora: localización, datos de la chimenea, y flujos de contaminantes emitidos, entre otros.


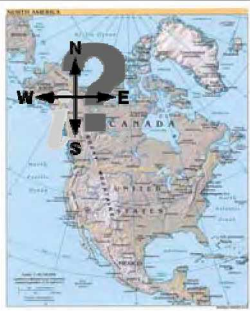


2) Dispersión: cálculo del incremento de las concentraciones de los contaminantes emitidos en las regiones afectadas (dominio local y regional), utilizando modelos de dispersión atmosférica.

3) Evaluación de impactos: selección de las funciones exposición-respuesta, las cuales relacionan un impacto físico observado o síntoma en la salud con una exposición dada a un contaminante.

4) Costos: evaluación monetaria de los impactos en la salud, tanto de morbilidad como de mortalidad.

Gráfico 1

ETAPAS DE LA METODOLOGÍA VÍAS DE IMPACTO

1. Caracterización de la fuente	2. Dispersión de contaminantes	3. Evaluación de impactos	4. Valoración económica
 <ul style="list-style-type: none"> -Localización -Tipo de chimenea -Parámetros de emisión 	 <ul style="list-style-type: none"> -Meteorología -Modelos de dispersión 	 <ul style="list-style-type: none"> -Elección de las funciones exposición-respuesta 	 <ul style="list-style-type: none"> -Métodos de valoración -Costo de los daños

Fuente: Elaboración propia.

Se utilizaron modelos computacionales diferentes al estudio anteriormente mencionado. Los cambios pueden resumirse de la siguiente forma.

1) La dispersión local se resuelve con el sistema de modelos AERMOD, en lugar del modelo ISCLT2, ambos de la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos. El

primero tiene en cuenta la topografía del terreno, el uso de los suelos, la deposición seca y húmeda de los contaminantes, entre otros aspectos importantes.

2) Para la dispersión regional se emplea el modelo Windrose Model Interpreter (WMI), en sustitución del enfoque simplificado considerado en el UWM (Uniform World Model) que utiliza el modelo SIMPACTS del OIEA. Se dispuso de una base de datos con información regional, recientemente integrada por la CEPAL, la cual cubre México, Centroamérica y el Caribe.

3) Se seleccionó un conjunto actualizado de funciones exposición-respuesta para estimar los impactos en la salud humana.

4) Se utilizó un nuevo programa computacional llamado: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de Instalaciones Energéticas (SEIA), el cual permite integrar los resultados de los modelos de dispersión AERMOD y el WTM con la información georreferenciada de población y salud en México para aplicar la ecuación de función del daño y la valoración de externalidades.

El programa ³ y la base de datos mencionados fueron desarrollados por especialistas de Cuba Energía dentro de un proyecto de investigación entre el Instituto Nacional de Ecología (INE) de la SEMARNAT, ⁴ Cuba Energía y la Sede Subregional de la CEPAL en México.

A continuación se describe cada una de las etapas de la metodología utilizada.

1. Caracterización de las fuentes emisoras

El primer paso consiste en obtener los datos técnicos de las fuentes de emisión, tanto de la refinería como de la central de generación eléctrica, incluyendo sus coordenadas geográficas, características físicas y un inventario detallado de los contaminantes emitidos. En el caso de la refinería existen numerosos puntos de emisión (calderas, quemadores elevados, quemadores de fosa, entre otros), mientras que en la central termoeléctrica funcionan calderas y turbinas de combustión.

³ El programa se encuentra en fase de desarrollo, en particular la interfase con el usuario, el tratamiento de errores, la ayuda en línea, entre otros. Será puesto a disposición de los países de la región por la CEPAL cuando esté concluido.

⁴ Por el INE participó la Dirección General de Investigación sobre la Contaminación Urbana y Regional.

2. Dispersión de contaminantes atmosféricos

a) Dispersión local

Para analizar la dispersión local de contaminantes se implementó el Sistema AERMOD de la EPA, que cuenta con tres componentes: el AERMAP, el AERMET y el AERMOD. Se usaron los programas de la EPA,⁵ haciendo las adecuaciones pertinentes para las condiciones de México y desarrollando algunas herramientas de cálculo complementarias.

La EPA a fines de 2005 estableció el AERMOD como el modelo de uso recomendado para el análisis de la dispersión de contaminantes a escala local, en sustitución del ISCST3 (Industrial Source Complex Short-Term 3), hasta ese momento usado.⁶ El AERMOD representa un sólido y significativo avance respecto del ISCST3; incorpora las técnicas más avanzadas de parametrización de la capa límite planetaria, dispersión convectiva, formulación de la elevación de la pluma e interacciones complejas del terreno con la pluma. En comparación con el ISCST3, AERMOD contiene nuevos o mejorados algoritmos para: i) la dispersión tanto en la capa límite estable como convectiva; ii) flotabilidad y elevación de la pluma; iii) penetración de la pluma dentro de la inversión elevada; iv) tratamiento de fuentes elevadas y bajas; v) perfiles verticales de viento, temperatura y turbulencia, y vi) tratamiento de receptores en todo tipo de terrenos. Una de las ventajas fundamentales del AERMOD es la modelación de terrenos complejos, lo cual es muy conveniente para las zonas estudiadas en el presente trabajo.

El sistema de modelos AERMOD⁷ incluye dos preprocesadores de datos de entrada: el AERMAP,⁸ para los datos del terreno, y el AERMET,⁹ para los datos meteorológicos. Con el primero, a partir de un Modelo Digital de Elevación de la zona a estudiar, se obtiene la altura respecto del nivel del mar de cada fuente y receptor considerados. Para los receptores se requiere adicionalmente la configuración topográfica entre la fuente y los receptores, con el objetivo de confirmar si hay elevaciones intermedias superiores a la altura del receptor. Por su parte, el AERMET usa las mediciones meteorológicas representativas de la zona en estudio para calcular ciertos parámetros de la capa límite, que se utilizan para estimar los perfiles de viento, turbulencia y temperaturas. Finalmente, el procesamiento de las capas de uso de suelo se realizó con un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS) y la información georrefenciada proporcionada por el INEGI bajo convenio institucional con SEMARNAT.

⁵ Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Atmospheric
(http://www.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm#aermod).

⁶ United States Environmental Protection Agency (2005).

⁷ United States Environmental Protection Agency (2004b).

⁸ United States Environmental Protection Agency (2004c).

⁹ United States Environmental Protection Agency (2004a).

b) Dispersión regional

Para evaluar la dispersión en el dominio regional se utilizó el Windrose Model Interpreter (WMI), que se basa en el Windrose Trajectory Model (WTM).¹⁰ Éste es un modelo lagrangeano, climatológico, receptor-orientado y de tipo rosa de los vientos en 24 sectores, de 15° cada uno. El tope de la capa de mezcla se considera de una altura promedio anual de 800 m.

El comportamiento de los contaminantes se describe usando una representación a largo plazo de los procesos relevantes: emisión, dispersión, transformaciones fisicoquímicas y deposición. Se obtiene sumando los resultados de las 24 trayectorias que arriban al proceso, ponderadas por las frecuencias de los vientos en cada sector. Cada trayectoria es seguida durante 96 horas antes de llegar a cada sitio receptor. Este procedimiento del WMI, en comparación con los modelos fuente-orientados, tiene la ventaja de que para cada sitio receptor se considera simultáneamente el efecto de todas las fuentes y no cada una por separado, lo cual puede ser significativo en estudios donde las reacciones que dan lugar a contaminantes secundarios son importantes y dependen de las concentraciones de contaminantes primarios existentes.

Los procesos químicos que considera el modelo se muestran en el gráfico 2, en el cual PM identifica al material particulado, NA a los aerosoles de nitrato no especificados (también identificado como pNO_3 en este informe). El aerosol de nitrato total (recuadro con líneas discontinuas a la izquierda) incluye NA y NH_4NO_3 , y el aerosol de sulfato total (recuadro con líneas discontinuas a la derecha) incluye H_2SO_4 y $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. El proceso de emisión está indicado por flechas rojas, las transformaciones químicas por flechas negras, la deposición seca y la deposición húmeda están indicadas por flechas verdes y azules, respectivamente.

Al ejecutar el WMI para un escenario de emisiones dado se examinan las emisiones de cada celda como una fuente, que a su vez interaccionan con las emisiones provenientes de las celdas restantes. Es por esto que para evaluar una fuente en particular se “corre” el WMI dos veces: i) el “caso base”, sin tener en cuenta las emisiones de la fuente (o fuentes) que se desea estudiar, y ii) el “caso real” que incluye las emisiones del “caso base” más las emisiones de la fuente que se estudia.

Finalmente, se restan las concentraciones obtenidas para cada contaminante en el caso base respecto del real, y generalmente se obtiene un incremento en las concentraciones de los contaminantes estudiados, aunque pueden presentarse decrementos para alguno de los contaminantes secundarios, en circunstancias que no favorezcan su formación con respecto a las condiciones del caso base.

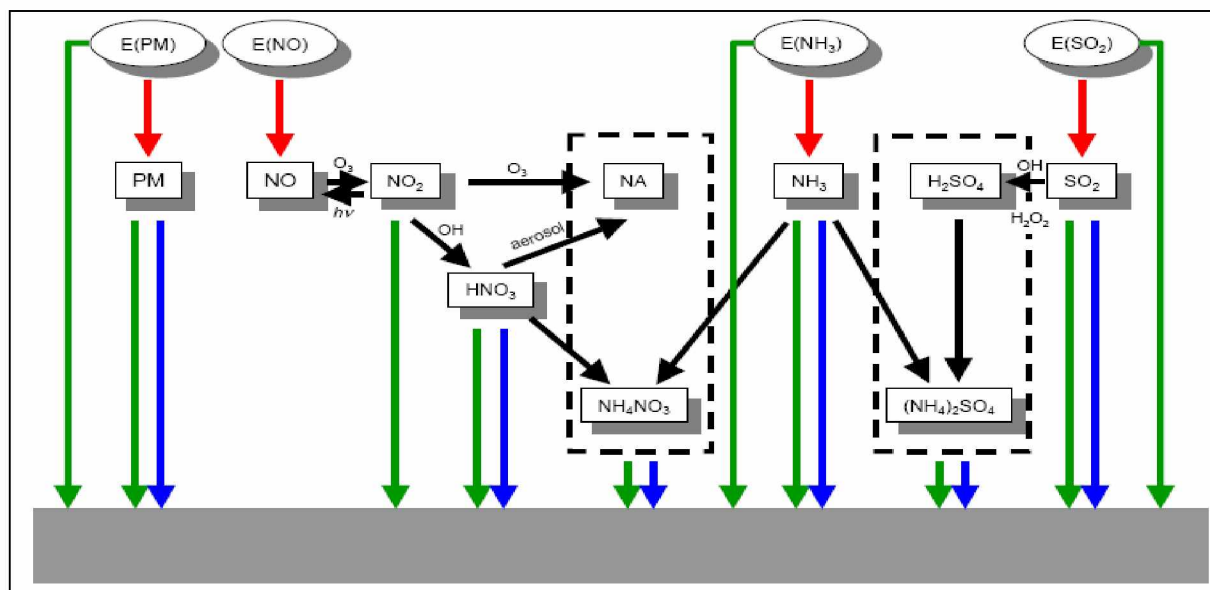
El modelo WTM requiere una base de datos meteorológicos y de emisiones que cubra el dominio regional, y que incluya para cada una de las celdas la información siguiente: i) rosa de los vientos representada por 49 valores (24 valores sobre la probabilidad de que el viento sople en 24 direcciones de 15 grados cada una y otros 24 valores de velocidad media del viento (m/s) en cada una de las direcciones, además de un valor medio único para la velocidad del viento sobre la celda); ii) precipitaciones promedio anuales; iii) emisiones altas y bajas de NO_x y SO_2 ;

¹⁰ Trukenmüller y Friedrich 1995.

iv) emisiones de NH_3 ; v) altura del punto medio de la celda sobre el nivel del terreno, y vi) población total.

Gráfico 2

CICLOS DE VIDA DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS



Fuente: Trukenmüller y otros (2001).

c) Características de los diferentes modelos

Algunas características de los modelos se listan a continuación.

- i) Tanto el AERMOD como el WMI contemplan una sola capa en la estructura vertical de la atmósfera, que se extiende desde el nivel del terreno hasta la altura de la capa límite planetaria.
- ii) El modelo WMI es del tipo climatológico, lo que implica que todos los datos y por supuesto los resultados son valores promedios anuales, en celdas de 55x55 km. Los datos de emisiones, precipitaciones y vientos son obtenidos de bases de datos internacionales.
- iii) El AERMOD no toma en cuenta la formación de especies secundarias, por lo que en el estudio no se evalúa el impacto de sulfatos y nitratos en el dominio local. El WMI sí estima una concentración de sulfatos y nitratos en la celda en la que se encuentran las fuentes de emisión, pero no se abarca en este estudio porque, en general, los modelos empleados para el análisis de la dispersión regional sobreestiman las concentraciones en el dominio local.

3. Evaluación de impactos

La tercera etapa de la Metodología Vías de Impacto tiene por objeto cuantificar los impactos, en este caso de las instalaciones del sector energía, sobre el medio ambiente. A continuación se describe la metodología de evaluación de impactos en salud y se explica el tratamiento de otros efectos, como el cambio climático, entre otros.

a) Impacto en salud

El elemento central de la metodología para evaluar el impacto en salud son las funciones exposición-respuesta (FER) que relacionan la exposición a un contaminante con una respuesta o efecto negativo en la salud. La exposición depende fundamentalmente de la concentración¹¹ de los contaminantes en el ambiente, determinada previamente. La respuesta se cuantifica mediante estudios toxicológicos, clínicos y epidemiológicos, los cuales vinculan un impacto físico observado o síntoma en la salud de un grupo poblacional con la exposición dada a un contaminante.

El estudio considera que las funciones exposición-respuesta para la evaluación de los impactos en salud son lineales y sin umbral, y obedecen a la siguiente ecuación:

$$I_i = \sum_j S_{FERi} * \Delta C_j * POB_j \quad [1]$$

donde: I_i : impacto en salud i ; se expresa en número de casos

S_{FERi} : pendiente de la función exposición-respuesta de un efecto i ; se expresa en número de casos/(persona-año- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

ΔC_j : incremento en la concentración de un contaminante en la localización j ; se expresa en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

POB_j : población en riesgo en la localización j ; se expresa en número de personas

La pendiente de la función S_{FER} se calcula con la siguiente ecuación:

$$S_{FER} = IRR * I_{ref}, \quad [2]$$

donde: IRR es el Incremento de Riesgo Relativo, se expresa en porcentaje de incremento en el número de casos para un efecto en salud específico por cada $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de contaminante.

I_{ref} es la tasa natural de incidencia (tasa basal); se expresa en número de casos por persona al año.

El Incremento de Riesgo Relativo (IRR), coeficiente estimado a partir de los estudios epidemiológicos, es el cambio en la tasa natural de incidencia por unidad de cambio en la

¹¹ En la literatura internacional también se emplea el término función concentración-respuesta. En rigor debería considerarse la dosis de exposición; es decir, la concentración de contaminante que es inhalada, medida en cada sujeto receptor; sin embargo, cuando no es posible su determinación se emplean las concentraciones en el ambiente.

concentración ambiente ($\%/ \mu\text{g}/\text{m}^3$). La tasa natural de incidencia es el número de nuevos casos de una enfermedad o número de defunciones, en un año, en un grupo de riesgo con respecto a la población total (porcentaje de adultos mayores, niños, y otros). En consecuencia, la pendiente de la función se expresa en casos anuales de enfermedad o muerte, por grupo de riesgo, por unidad de concentración de contaminante en el aire (casos/(año-persona- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)).

Al igual que en el estudio anterior, la evaluación del impacto en la salud se circunscribió al daño por la exposición a los contaminantes críticos en el aire, por su potencial perjuicio en la salud: las partículas (PM_{10}), sulfatos y nitratos y el dióxido de azufre. A fin de evaluar los efectos de los sulfatos y nitratos, contaminantes secundarios formados a partir de sus precursores primarios SO_2 y NO_2 , se siguieron los nuevos criterios de ExternE¹² publicados en el año 2005, que consideran las siguientes relaciones de toxicidad para estimar las pendientes de las funciones para los sulfatos y nitratos:

- toxicidad de sulfatos igual a la de PM_{10} ($S_{\text{FER}} \text{ sulfatos} = S_{\text{FER}} \text{ PM}_{10}$)
- toxicidad de nitratos igual a la mitad de PM_{10} ($S_{\text{FER}} \text{ nitratos} = 0.5 S_{\text{FER}} \text{ PM}_{10}$)

El impacto en salud estimado en el trabajo anterior tuvo como componente principal la mortalidad crónica,¹³ resultado consistente con estudios realizados a nivel internacional. Se aplicó el enfoque de Años de Vida Perdidos y, al no disponer de información para el país, se asumió que una muerte estadística equivale a 10 Años de Vida Perdidos, valor promedio entre los obtenidos para Europa y Estados Unidos, de 11 y 9 años, respectivamente.¹⁴ Por la relevancia de este impacto, el presente estudio profundizó en el análisis de la mortalidad crónica con objeto de afinar los estimados y utilizar las estadísticas del país en la determinación de la pérdida de expectativa de vida.

Existen dos enfoques para determinar la pendiente de la función exposición-respuesta que expresa el impacto de la contaminación atmosférica en la mortalidad: i) casos de mortalidad evitados, y ii) pérdida de expectativa de vida. El primer enfoque estima las FER directamente a partir de los IRR determinados en los estudios epidemiológicos y utiliza como unidad de medida el número de muertes que estadísticamente se correlacionan con incrementos en la contaminación. El segundo enfoque estima la pérdida de expectativa de vida asociada a la exposición, aplicando una metodología alterna para expresar las FER en Años de Vida Perdidos (AVP), en lugar de estimar el número de muertes.

En este estudio se aplicó el segundo enfoque de pérdida de expectativa de vida, al igual que en el proyecto ExternE; la pendiente de la función exposición respuesta (S_{FER}) en

¹² European Commission, ExternE (2005).

¹³ El término mortalidad crónica se aplica a los casos de muerte ocasionados por la exposición prolongada a la contaminación. Para determinar el valor del IRR correspondiente, es necesario realizar estudios muy complejos, de largo plazo, denominados “estudios cohortes”. Requieren el monitoreo de la exposición a la contaminación de poblaciones de estudio y del control de variables, tales como edad, sexo, peso, estatura, dieta, hábitos (tabaco, alcohol), entre otros. Por los recursos que implica su realización, hay pocos estudios realizados principalmente en Estados Unidos.

¹⁴ Estos valores fueron estimados por Spadaro.

AVP/(persona-año- $\mu\text{g}/\text{m}^3$), se obtuvo a partir del Riesgo Relativo calculado en los estudios de cohorte y la pérdida de la expectativa de vida asociada a un incremento de dicho riesgo.¹⁵

Finalmente, en cuanto a la mortalidad aguda,¹⁶ bajo el enfoque de pérdida de expectativa de vida se considera que una muerte aguda equivale a 0,5 Años de Vida Perdidos. Solamente se utiliza una FER de mortalidad aguda con el fin de valorar el impacto del SO_2 . En el caso de las partículas se evalúa únicamente la mortalidad por la exposición de largo plazo (mortalidad crónica) para evitar el doble conteo.

b) Otros impactos

Además de los efectos en la salud, los contaminantes atmosféricos tienen impacto en el cambio climático, en los ecosistemas y en los materiales en general.

Por lo que se refiere al impacto en el cambio climático, las metodologías para su evaluación se basan en dos enfoques: i) cuantificación del daño, y ii) costos de evitar el daño. Bajo el primer enfoque se cuantifican algunos de los impactos atribuibles al cambio climático, tales como el impacto en zonas costeras, agrícolas y forestales, en recursos hídricos y ecosistemas naturales, y en la salud de la población (por ejemplo, casos de defunción por estrés de calor y frío, y malaria). El proyecto ExternE utiliza la última versión del Modelo FUND (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution), que evalúa estos impactos en 16 regiones del mundo.¹⁷

El segundo enfoque se basa en la estimación de los costos de mitigación de emisiones, pues a pesar de los esfuerzos por evaluar el daño, éste aún no ha sido contemplado en su totalidad. Este enfoque considera una meta de reducción de emisiones (por ejemplo, las metas establecidas por país en el Protocolo de Kyoto) y define las opciones tecnológicas posibles para abatir las emisiones a dicho nivel. La valuación económica asigna a cada opción un costo de disminución por tonelada.

El daño a los ecosistemas se evalúa a partir de la carga crítica de un contaminante que puede afectar el equilibrio del ecosistema. La carga crítica se define como “la máxima deposición de compuestos acidificantes que no provoca cambios químicos en los suelos, y que por tanto, no provoca efectos negativos en la estructura y en el funcionamiento de los ecosistemas”.¹⁸ La deposición de compuestos de azufre y nitrógeno causa acidificación de los ecosistemas acuáticos y terrestres que se traduce, entre otras secuelas, en suelos menos fértiles y en afectaciones a los organismos acuáticos que no toleran las condiciones de acidez. Estos efectos pueden pasar inadvertidos por algún tiempo hasta que el umbral de carga crítica es sobrepasado y el deterioro es visible, con los costos económicos y sociales derivados. Para cuantificar el daño en

¹⁵ Leksell y Rabl (2001).

¹⁶ Se denomina “mortalidad aguda” a aquella que se asocia estadísticamente a episodios de exposición a la contaminación en estudios de “series de tiempo”, y “mortalidad crónica”, a la derivada de la exposición a la contaminación en tiempos largos en estudios de “cohorte”.

¹⁷ Véase European Commission, ExternE (2005), *Methodology Update*, pp. 181-188.

¹⁸ OMS (2000).

ecosistemas se toma en cuenta la superficie que rebasa las cargas críticas por la deposición de contaminantes (SO_2 y NO_x) proveniente de las emisiones generadas en la producción de energía.

Para valorar el impacto en materiales existen algunas funciones exposición-respuesta que determinan, por ejemplo, la corrosión adicional inducida por la deposición de SO_2 en materiales de construcción. Este estudio no incluye este impacto.

4. Evaluación monetaria

La cuarta y última etapa de la Metodología Vías de Impacto tiene por objeto estimar el costo económico de los impactos, utilizando la ecuación siguiente:

$$D_i = I_i \cdot CU_i \quad [3]$$

donde: D_i , costo estimado del daño para un impacto i , se expresa en dólares por año

I_i , impacto en salud i calculado por la ecuación [1]; se expresa en casos por año

CU_i , costo unitario de un impacto i , se expresa en dólares por año (por ejemplo, costo por cada caso).

Con este fin, se aplica la teoría económica para determinar la pérdida de bienestar en que incurre la sociedad, en términos de su valor monetario. El supuesto fundamental que subyace a esta valoración es que los individuos son capaces de determinar el beneficio que reciben del consumo de un bien o servicio y, que por tanto, están dispuestos a intercambiar su valor monetario en la medida en que se mantenga su nivel de bienestar.

a) Valoración de impactos en la salud

El valor total para la sociedad relacionado con un efecto adverso en salud tiene dos componentes: el primero, el costo de la enfermedad para el paciente, que incluye el valor total de los recursos para su tratamiento (medicamentos, honorarios, y otros) y la pérdida de productividad por el tiempo que se está enfermo; y el segundo componente, que se refiere al valor que asigna una persona a la posibilidad de evitar el dolor y el sufrimiento y, en términos generales, a estar sano (Voluntad a Pagar, VAP).¹⁹ El primer componente puede valorarse con precios de mercado, mientras que el segundo no tiene precios de mercado que puedan servir como referencia directa.

El estudio anterior de la SEMARNAT y la CEPAL utilizó los dos tipos de valoración en dependencia del impacto analizado. En el caso de la morbilidad, se investigaron únicamente los costos directos de la enfermedad y la pérdida de productividad (a través de precios de mercado en México). Para el caso de la mortalidad se utilizaron valores de Voluntad a Pagar (transferidos de Europa). En el presente estudio se decidió homogeneizar las técnicas de valoración e incluir

¹⁹ Por la naturaleza del bien, este segundo componente es altamente subjetivo, y está evidentemente limitado por el ingreso disponible del individuo. Sin embargo, es la técnica recomendada a nivel internacional para valorar este tipo de “bienes”.

también la Voluntad a Pagar en los costos asociados a la morbilidad.²⁰ Cuando no se contó con valores de VAP de estudios nacionales, se empleó la técnica de transferencia de costos con base en las relaciones de ingreso, entre Europa y México.

Se hizo una revisión a la valoración de la mortalidad en este estudio, por tener el mayor peso en las externalidades. Se tomó como referencia un estudio reciente que determina el Valor Estadístico de la Vida (VEV)²¹ para el caso de México, basándose en compensaciones salariales.²² A partir de dicho valor, se estimó el Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP), con base en la metodología propuesta por Leksell y Rabl (2001) a fin de estimar el costo de la pérdida de vida por exposición prolongada a la contaminación atmosférica (mortalidad crónica).

En el estudio de sensibilidad se presentan los resultados obtenidos al incorporar otros enfoques para valorar la mortalidad, por su importante contribución al total de los costos externos. Se analizó la mortalidad bajo el enfoque de número de casos, en lugar de Años de Vida Perdidos, para lo cual se utilizó el Valor Estadístico de la Vida estimado para México en un primer análisis, y en el segundo, los resultados de transferir el VEV de Estados Unidos, valor que proviene del análisis de 26 estudios, que emplean tanto la técnica de precios hedónicos como la valoración contingente.

b) Valoración de otros impactos

La Metodología de Vías de Impacto requiere estimar la magnitud del impacto en términos físicos y después su valoración. Este enfoque ha sido idóneo para valorar los efectos en salud, pero no ha sido posible su aplicación para valorar los perjuicios en los ecosistemas o en el cambio climático, porque la estimación de los impactos físicos es aún limitada.

El proyecto ExternE estimó los daños en el cambio climático por medio de modelos, en el orden de 9 euros por tonelada de CO₂, estimado conservador, en el sentido de que únicamente se incluyeron en la valoración los daños que se pudieron cuantificar con un grado de confianza razonable. Para la valoración de los efectos en el cambio climático, ExternE consideró, en lugar del costo del daño, el costo de reducir emisiones para Europa, tomando como meta las establecidas por el Protocolo de Kyoto. Dicho costo se encuentra en un rango de entre 5 y 20 euros por tonelada de CO₂. En adición, como referencia utiliza el precio que tiene una tonelada de CO₂ en el mercado derivado del Protocolo de Kyoto, que en octubre de 2005 era de 24 euros por tonelada de CO₂.²³ ExternE considera un valor de 19 euros por tonelada de CO₂, que corresponde a un precio sombra, basado en los costos de mitigar emisiones en los países europeos

²⁰ El estudio anterior omitió la VAP por impactos en morbilidad, con el fin de obtener un estimado conservador. Sin embargo, expertos en la materia han sugerido que es necesario sumar la VAP, con el propósito de tener un estimado completo de la pérdida de bienestar social.

²¹ El Valor Estadístico de la Vida (VEV) es el valor que una comunidad está dispuesta a pagar (VAP) para reducir el riesgo de que ocurra una muerte. Por ejemplo, si en una comunidad cada persona está dispuesta a pagar 50 dólares por medidas para evitar una muerte por cada 10 000 habitantes, el VEV sería de 50 dólares dividido entre 1/10 000, o sea, 500 000 dólares.

²² Hammit e Ibararán (2006).

²³ Última fecha de actualización de ExternE. Cabe señalar que posteriormente han habido fluctuaciones importantes del precio de una tonelada de CO₂ en Europa.

para alcanzar un 8% de reducción respecto de su línea base del año 1990, de conformidad con las metas establecidas en el Protocolo de Kyoto para el período 2008-2012.

Por lo que se refiere a la valoración de ecosistemas, ExternE determinó por medio de precios sombra el valor de mantener una hectárea de ecosistema no afectado (una hectárea en la que no se rebasen las cargas críticas de contaminante). Dicho estudio considera que la Voluntad a Pagar por mantener una hectárea de ecosistema inalterado se encuentra en el rango de 63 a 350 euros/ha para Europa y entre 338 a 674 euros/ha para la Unión Europea (EU15).

B. NUEVO PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LAS EXTERNALIDADES

Para la estimación de las externalidades se utilizaron dos módulos integrados al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de Instalaciones Energéticas, SEIA versión 2, basado en la Metodología de Vías de Impacto.

1) ExtLocal para el cálculo de las externalidades en el dominio local a partir de los resultados de estudios de dispersión detallados, usando el ISCST3 o el AERMOD. Este módulo permite además estimar las externalidades en el dominio regional utilizando las ecuaciones ²⁴ del UWM incluido en el modelo SIMPACTS ²⁵ /AIRPACTS ²⁶ del OIEA.

2) ExtReg, para el cálculo de las externalidades en el dominio regional a partir de los resultados del WMI. Esta plantilla también calcula los totales en ambos dominios, teniendo en cuenta los resultados de ExtLocal.

Entre las características más importantes del programa se cuentan las siguientes: es flexible en cuanto a la modelación de la dispersión en el dominio local, ya que permite emplear modelos que se hallan en el estado del arte, definir las dimensiones del dominio local y de sus celdas sin sujetarse a la rejilla regional, así como evaluar varias fuentes que se encuentren dentro del dominio local; en cuanto a la dispersión regional, permite evaluarla al detalle que hace ExternE, adaptando la meteorología, la población y las emisiones de fondo al dominio de la región de México, Centroamérica y el Caribe.

El programa también permite comparar los resultados de análisis simplificados y detallados. Para que la comparación sea representativa se deben estimar previamente todas las variables involucradas en las metodologías simplificadas, fundamentalmente las velocidades de decaimiento y el radio del dominio regional.

²⁴ OIEA (2002a), *AIRPACTS*.

²⁵ OIEA (2003), *SIMPACTS*.

²⁶ OIEA (2002b), *AIRPACTS Manual*.

II. INFORMACIÓN PARA LOS MODELOS UTILIZADOS

La aplicación de la Metodología de Vías de Impacto para la evaluación de externalidades requirió una serie de datos técnicos, económicos y de salud. La información utilizada corresponde al año 2004, salvo cuando se aclare expresamente otra fecha.

A. INSTALACIONES DEL SECTOR ENERGÍA

Con base en la información estadística del sector energía para el año 2004 y el potencial impacto ambiental de las instalaciones, se seleccionaron los sitios cuyas externalidades serían evaluadas. En el caso del sitio de Tula, en el estado de Hidalgo, se consideraron la Refinería Miguel Hidalgo y las Centrales Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos y Ciclo Combinado Tula. Para la zona de Salamanca, en el estado de Guanajuato, se incluyeron la Termoeléctrica de Salamanca y la Refinería Ing. Antonio M. Amor.

1. Selección de las fuentes fijas de emisión

El Sistema Nacional de Refinación procesó durante 2004 un total de 1 303 000 barriles diarios (bd) de crudo²⁸ y emitió a la atmósfera un total de 501 530 toneladas de contaminantes y 16,12 millones de toneladas de gases de efecto invernadero.²⁹ Del total de emisiones, 413 839 toneladas corresponden a SO₂, 34 312 a NO_x y 17 732 a partículas totales.

Las refinerías evaluadas en este estudio, ubicadas en Tula y Salamanca, procesaron 38% del crudo, y emitieron 41% del volumen de SO₂, 6% de NO_x, 27% de las partículas y 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero del total emitido por el Sistema Nacional de Refinación.

Respecto del sector eléctrico, en el 2004 la Comisión Federal de Electricidad (CFE)³⁰ generó 129 504 GWh en centrales termoeléctricas, que representa el 80% del total de la electricidad generada por la Comisión de Luz y Fuerza del Centro (LFC). Las termoeléctricas seleccionadas aportaron el 21% del total generado en centrales de vapor. La electricidad generada en Tula, por sí misma, representa cerca del 7% del total de la generación nacional.

²⁸ PEMEX (2006).

²⁹ PEMEX (2005a).

³⁰ CFE (2005b).

Cuadro 1

PROCESO DE CRUDO POR REFINERÍA

(Miles de barriles diarios)

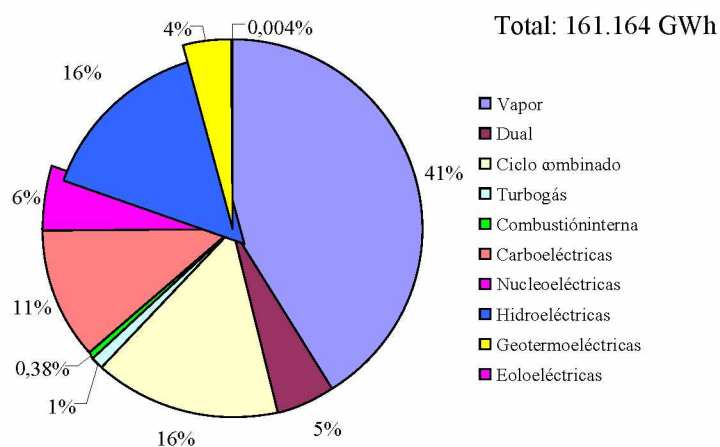
Refinería	Crudo procesado
Total	1 303,4
Cadereyta	212,8
Madero	145,3
Minatitlán	167,0
Salamanca	198,6
Salina Cruz	287,9
Tula	291,9

Fuente: PEMEX, *Anuario Estadístico 2005*.

Gráfico 3

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN MÉXICO, 2004

(GWh)

Fuente: CFE, *Informe de Operación 2004*.
No incluye productores independientes.

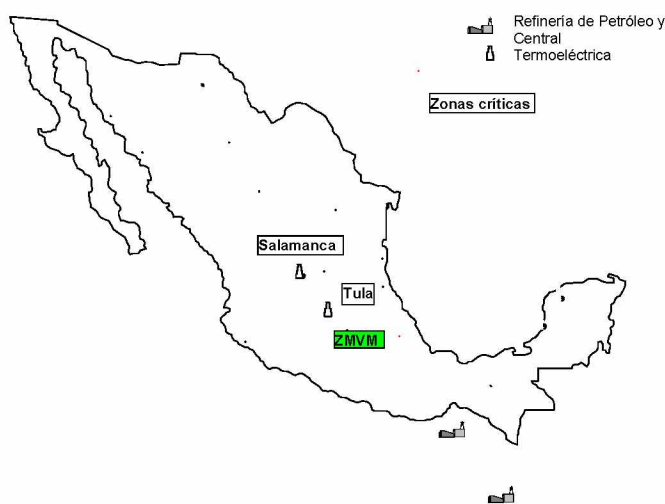
El Sistema Eléctrico Nacional emitió en 2004 un total de 1 229 039 toneladas de SO₂, 163 759 de NO_x, 114 071 de partículas y 84,5 millones de toneladas de gases de efecto invernadero. Las centrales seleccionadas aportaron al total nacional 11% del SO₂, 13% de las partículas, 7% de los NO_x, y alrededor del 11% de los gases de efecto invernadero.³¹

³¹ SENER (2004) (www.sener.gob.mx).

Los sitios seleccionados se ubican en zonas que la NOM-085 considera como zonas críticas, por el volumen de emisiones y por su proximidad a centros de población: el corredor industrial Irapuato-Celaya-Salamanca en el estado de Guanajuato y el corredor industrial Tula-Vito-Apasco en los estados de Hidalgo y de México.

Mapa 1

UBICACIÓN DE LAS INSTALACIONES SELECCIONADAS EN EL ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia.

Este mapa no sanciona fronteras nacionales ni internacionales.

2. Datos técnicos de las fuentes seleccionadas

Las emisiones totales se estimaron a partir del consumo de combustibles en 2004 de cada una de las plantas del sector energía, aplicando los factores de emisión de la EPA (AP-42). En Tula, en el caso de la central termoeléctrica, se consideraron las emisiones de un total de nueve puntos de emisión: cuatro turbinas de gas y cinco calderas de combustión que utilizan combustóleo con un contenido de azufre de 3,6%. Para las turbinas que utilizan gas natural sólo se contabilizaron las emisiones de NO_x y no las de SO_2 y PM_{10} , por ser estas últimas mucho menores que las derivadas del uso de combustóleo.

En el caso de la refinería se contemplaron los puntos de mayor emisión, responsables del 98% de las emisiones, constituidos por cinco puntos asociados a equipos de procesos, siete calderas, tres quemadores elevados (QE_i) y un quemador de fosa (QF) que agrupa a todos los existentes. Las emisiones totales de los tres quemadores elevados se repartieron de acuerdo con el flujo reportado para cada uno de ellos con relación al total, y se modelaron como fuentes puntuales. Conviene mencionar que no se tomaron en cuenta las emisiones de SO_2 para los quemadores de fosa, ni las emisiones contaminantes de los equipos que queman gas de refinería, por no conocerse su composición, pero es necesario señalar que podrían ser muy significativas.

Los datos técnicos de las fuentes consideradas para el análisis de dispersión en Tula y los promedios de emisión derivados de la emisión anual se resumen en el cuadro 2.

Cuadro 2

TULA: DATOS TÉCNICOS DE LAS FUENTES CONSIDERADAS

Clave Punto de emisión COA	Altura (m)	Temperatura (°K)	Velocidad (m/s)	Diámetro (m)	SO ₂ (g/s)	NO _x (g/s)	PST (g/s)
CFE Turbinas							
CC1,6	25,9	419	14,3	5,1		31	0
CC1,7	25,9	429	14,6	5,1		29	0
CC2,5	25,9	407	20,2	5,1		30	0
CC2,6	25,9	419	16,1	5,1		30	0
CFE Calderas							
CTE1	65	436	29,7	6,9	622	73	40
CTE2	65	449	31,0	6,9	815	113	52
CTE3	65	449	31,0	6,9	614	95	39
CTE4	65	449	31,0	6,9	802	114	51
CTE5	65	449	31,0	6,9	583	128	37
Total central termoeléctrica					3 436	643	219
PEMEX Refinería							
BA101A	65,2	588	6,5	2,8	83	7	5
BA101B	65,2	585	6,9	2,8	83	7	5
ABA1/2	73,5	596	4,4	4,2	278	22	18
BA201	55	599	7,9	2,1	47	4	3
VBA1/2	72,5	575	1,9	3,1	47	4	3
CB1	30,8	430	13,5	3,4	155	12	10
CB2	30,8	426	12,8	3,4	155	12	10
CB3	30	424	16,2	3,4	155	12	10
CB4	29	438	6,5	3,4	155	12	10
CB5	45	661	14,5	3,8	155	12	10
CB6	45	442	14,0	4,0	155	12	10
CB7	45	433	17,9	3,8	155	12	10
QE1	71,2	1273	2,2	2,2	605	2	35
QE2	64,4	1273	0,9	2,5	303	1	17
QE3	64	1273	5,5	2,1	983	3	75
QF	0,5	1273	0,0	55,4		22	18
Total refinería					3 514	156	249
Total Tula					6 950	799	468

Fuente: Elaboración propia con base en datos de PEMEX y de CFE de emisiones y en sus Cédulas de Operación Anual (COA).

En el caso de Salamanca se evaluaron cuatro calderas de combustión de la termoeléctrica que utilizan combustóleo con contenido de azufre igual a 3,6%. En la Refinería Ing. Antonio M. Amor se consideraron sólo los puntos de mayor emisión, responsables de 98% de las emisiones, constituidos por siete puntos asociados a procesos, seis calderas y un quemador que agrupa a todos los existentes. El quemador se modeló como una fuente puntual. Las emisiones se estimaron también con base en los factores de emisión de la EPA (AP-42) y en el consumo de combustible durante 2004, excepto para los quemadores, para los cuales se consideró la información proporcionada por PEMEX Refinación. Al igual que en Tula, no se incluyeron las emisiones fugitivas desde los tanques de almacenamiento ni las emisiones resultantes de la quema de gas de refinería.

Los datos técnicos de las fuentes, usados en los cálculos de dispersión en la zona de Salamanca, se presentan en el cuadro 3.

3. Dominio local de modelación

Para la zona de Tula se delimitó como dominio local un cuadrado de 100x100 km dividido en celdas de 2x2 km centrados en las coordenadas ³² X=472 500, Y=2 157 500, lo que da un total de 2 500 puntos receptores. El punto receptor más al sur y al oeste se ubica en las coordenadas X=423 500, Y=2 157 500. En Salamanca se identificaron también un total de 2 500 puntos receptores, representados en los puntos centrales del mismo número de celdas de 2x2 km en que se seccionó un dominio de 100x100 km, centrado en las coordenadas X= 273 000, Y= 2 277 000. El receptor más al sur y al oeste se ubica en las coordenadas X=224 000, Y=2 228 000.

Para obtener la población en cada celda del dominio local, se interceptaron con un Sistema de Información Geográfico (SIG) la capa de población original de México y las rejillas de 100x100 km con celdas de 2x2 km como capas que representan los dominios locales, tanto en Tula como en Salamanca; mediante una suma pesada se obtuvo la población en cada celda. La población total del dominio local en Tula es de 6 369 906 habitantes, lo que implica una densidad promedio de 579 habitantes/km²; la de Salamanca es de 2 254 138 habitantes y 225 habitantes/km².

Para obtener la información topográfica se usó el Modelo Digital de Elevación de México. ³³ Además, se procesó la capa de usos del suelo de México, ³⁴ utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) a fin determinar el porcentaje de cada una de las categorías en cada sector y por tanto la categoría de uso de suelos más representativa para cada uno de los 36 sectores de 10° en un plano de coordenadas polares del dominio, con un radio de 50 km, con centro en la refinería. Esta información se requiere para considerar la influencia del tipo de suelo en la dispersión. Una vez definida la categoría predominante para cada sector, se alimentó el modelo considerando la correspondencia entre las categorías definidas en la capa de uso de suelos de México y las categorías en el AERMET y el AERMOD, que se muestran en el cuadro 4.

³² Las coordenadas se refieren al sistema de referencia UTM Zona 14.

³³ INEGI, Licencia DGAD-0111/2005. Perfiles de uso de suelo, versión 1.2.

³⁴ *Ibidem*.

Cuadro 3

SALAMANCA: DATOS TÉCNICOS DE LAS FUENTES CONSIDERADAS

Clave Punto de emisión COA	Altura (m)	Temperatura (°K)	Velocidad (m/s)	Diámetro (m)	Emisiones, g/s		
					SO ₂	NO _x	PST
Central termoeléctrica							
CFE1	51,2	425	28,9	3,9	126	23	10
CFE2	51,2	423	31,5	3,9	127	22	10
CFE3	64,6	438	20,1	2,7	586	47	46
CFE4	49,7	417	29,2	3,4	376	33	29
Total termoeléctrica					1 215	125	95
Refinería							
LGH301	2,9	592	19,2	1,2	9	1	1
LBH1	34,2	565	4,2	2,0	30	2	2
LBH5	17,3	473	5,5	2,7	8	1	1
LBH9	16,0	473	4,1	3,1	8	1	1
U5F	48,7	705	3,8	2,3	24	2	2
RDBA	60,8	757	1,5	2,6	181	12	14
ASBA	77,0	590	11,1	2,1	62	4	5
CB3	25,0	480	7,9	2,5	98	6	8
CB4	25,0	459	6,6	2,5	101	6	8
CB5	25,0	463	6,2	2,5	101	6	8
CB6	43,0	420	6,8	2,7	6	0	1
CB7	43,0	426	8,1	2,7	31	2	2
CB9	40,0	514	5,7	2,5	85	5	7
QE1	61,5	1,273	3,0	0,9	720	60	48
Total refinería					1 462	107	106
Total Salamanca					2 677	232	201

Fuente: Elaboración propia con base en datos de PEMEX y de CFE de emisiones y en sus Cédulas de Operación Anual (COA).

En Tula, para la mayoría de los sectores la categoría predominante es la de terreno agrícola, excepto en dos sectores donde predominan los pastizales y en uno los bosques. En Salamanca, la categoría predominante es también el terreno agrícola, excepto en dos sectores donde predominan los bosques y tres sectores donde predominan los pastizales.

Cuadro 4

**CORRESPONDENCIA ENTRE LAS CATEGORÍAS DE LA CAPA DE USO
DE SUELO DE MÉXICO Y LAS DEL AERMET Y AERMOD**

Capa de uso de suelos	Categorías AERMET	Categorías AERMOD
Asentamiento humano		Área suburbana, con vegetación
Zona urbana	Zona urbana	Zona urbana sin vegetación
Cuerpo de agua	Cuerpo de agua	Cuerpo de agua
Agricultura de riego		
Agricultura de temporal	Terreno agrícola	Terreno agrícola
Bosque cultivado		
Bosque de coníferas		
Bosque de encino	Bosque de coníferas	
Selva caducifolia	Bosque caducifolio	Bosques
Desprovisto de vegetación		
Especial (otros tipos)		
Matorral xerófilo		
Sin vegetación aparente	Desierto	Terreno árido, principalmente desierto
Vegetación hidrófila	Pantano	Terreno húmedo no boscoso
Pastizal		
Vegetación inducida	Pradera	Terreno de pastizal

Fuente: Elaboración propia con base en las categorías de uso de suelo definidas por el INEGI para México y las categorías establecidas en las guías de la EPA para la implementación de los modelos AERMET Y AERMOD.

4. Dominio regional de modelación

La base de datos regional cubre el área de México, el Caribe, América Central y la península de la Florida. Contiene datos en una resolución de 55x55 km, en una rejilla con origen³⁵ en 120 Oeste, 5 Norte, que abarca 120x60 celdas. Los receptores evaluados en el dominio regional se definieron como las celdas que se encuentran a menos de 1 500 km de la refinera de petróleo en cada caso, rango típico de los estudios de dispersión regional.

Para obtener los datos de población por celdas del dominio regional se procedió en forma similar al dominio local: con un SIG se interceptó la capa de población que cubre todo el dominio regional con la capa que representa dicho dominio.

También se determinó la población total en un área de 1 000 km de radio centrada en el mismo punto que el dominio local, tanto en Tula como en Salamanca, con el fin de determinar el

³⁵ Se utilizó la proyección Cónica de Lambert.

impacto regional, usando metodologías simplificadas para comparar con los resultados del estudio de 2004. La población total en el dominio de 1 000 km de radio centrado en Tula asciende a 89 777 703 habitantes, con una densidad regional de 28,6 habitantes/km², en tanto que en Salamanca asciende a 86 596 984 habitantes, con una densidad regional de 27,6 habitantes/km².

B. DATOS METEOROLÓGICOS

1. Datos meteorológicos para la dispersión local

Para la zona de Tula se utilizaron como datos meteorológicos básicos los medidos por la estación *in situ* de la central termoeléctrica, localizada en las coordenadas 20,050N y 99,340O. La estación registra dirección y velocidad del viento, desviación estándar de la dirección horizontal del viento, temperatura, presión, radiación solar y humedad relativa. Los datos de cada 15 minutos (4 por hora) para el año 2004 se procesaron para obtener los datos horarios.

Se escogió como estación de superficie representativa la de Huichapan, localizada en 20,39N y 99,66O, unos 47 km al noroeste de Tula. Registra cada 10 minutos la dirección y velocidad del viento, temperatura, presión, radiación solar, humedad relativa y tasa de precipitación; asienta además el valor máximo de la dirección y velocidad del viento en ese mismo período. De 52 704 datos que debían ser procesados para obtener los datos horarios, estuvieron disponibles 50 534, 95,9% del total.

Como estación de aire superior representativa se escogió la del aeropuerto de la ciudad de México, la que registra los datos de aire superior más cercano a la zona de estudio. Se localiza en 19,417N y 99,067O, a unos 83 km de Tula en dirección sur-sureste. Procesa la información de dirección y velocidad del viento, temperatura y presión a diferentes alturas, generalmente dos veces al día. Del total de 732 datos que debían ser procesados se contó con 624, 85,2% del total. El código fuente de la EPA fue modificado para poder procesar datos de presión barométrica de superficie inferiores a 800 mbar que prevalecen en el dominio local.

En el caso de la zona de Salamanca, se escogió como estación *in situ* la de Nativitas, perteneciente a la Red Ambiental de Monitoreo de Salamanca. Esta estación registra datos horarios de dirección y velocidad del viento, desviación estándar de la dirección horizontal del viento, temperatura, presión, radiación solar y humedad relativa. La estación se localiza en 20,57N, 101,19O.

La estación de superficie representativa fue la de la presa Allende, la cual registra cada 10 minutos la dirección y velocidad del viento, la temperatura, presión, radiación solar, humedad relativa y tasa de precipitación. De 52 704 datos que debían ser procesados, están disponibles 51 973 (98,6% del total). La estación se localiza en 20,84N, 100,82O. En esta zona no se utilizaron datos de aire superior por considerarse que ninguna de las estaciones que los registran es representativa del dominio local. En este caso se aplicaron criterios para la determinación de la altura de capa de mezcla por métodos indirectos.

Para estimar la deposición de gases en el AERMOD se utilizaron los parámetros recomendados en la literatura internacional, adecuados, en su caso, a las condiciones del país.

2. Datos para dispersión regional

El modelo utilizado WTM requiere de una base de datos meteorológicos y de emisiones que cubran el dominio regional. Una parte considerable de la información necesaria se encuentra disponible en la base de datos que ha integrado la Sede Subregional de la CEPAL en México. Dicha base de datos fue elaborada con anterioridad a este estudio, como parte de un proyecto de investigación entre el Instituto Nacional de Ecología de la SEMARNAT, CubaEnergía y la CEPAL. La base cuenta con casi 400 000 datos, para lo cual se procesaron casi 158 millones de datos de las diferentes fuentes de información. La definición de las principales variables se presenta a continuación.

a) Rosa de los vientos

Para la creación de las rosas de los vientos se partió de la base de datos NCEP/NCAR Reanalysis Data³⁶ (United States of America, National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research). Para obtener promedios anuales más representativos fueron procesados cinco años de datos (2000-2004).

En el procesamiento de los datos de viento para el WTM se seleccionan los componentes del viento a 925 mbar; éstos corresponden aproximadamente a 800 m de altura sobre el nivel del mar. Los datos del Reanalysis Data tienen una resolución de 2,5x2,5 grados de latitud-longitud, así que una vez obtenidos los dos ficheros anuales con los componentes de dirección y velocidad del viento para todas las celdas (5 ficheros para cada componente, por utilizarse 5 años de datos), se utilizó el programa Windrose para calcular las rosas de vientos más probables o promedio en una rejilla de 0,5x0,5 grados. El programa Windrose fue el usado con el mismo propósito en las diferentes implementaciones del EcoSense (Europa, China, América del Sur y Federación de Rusia).

A fin de mejorar la selección de los datos de viento y las rosas de viento resultantes en dependencia de la altura del terreno, se realizaron modificaciones adicionales al programa Windrose, las cuales están orientadas a promediar los componentes del viento de los dos niveles isobáricos, entre los cuales se encuentra el valor de 800 m sobre el nivel de la superficie.

Para obtener los datos de vientos en las celdas en la proyección seleccionada (como resultado del Windrose se obtienen los datos de celdas de 0,5x0,5 grados sobre una proyección latitud/longitud), se procesó el fichero salido del Windrose directamente en un SIG, realizando un promedio proporcional de las áreas interceptadas. Finalmente, se obtienen para cada una de las 7 200 celdas del dominio seleccionado una rosa de vientos promedio en el quinquenio 2000-2004 representada por 49 valores: 24 valores que representan la probabilidad de que el viento sople en 24 direcciones de 15 grados cada una y otros 24 valores de velocidad media del viento (m/s) en

³⁶ NCEP/NCAR, Reanalysis Data (<http://dss.ucar.edu/datasets/ds090.0/data/pgbf00-grb2d>).

cada una de las direcciones. Además se obtuvo un valor medio único para la velocidad del viento sobre la celda, que puede usarse alternativamente, sustituyendo la información más detallada de la velocidad en cada dirección.

b) Precipitaciones

Para obtener las precipitaciones promedio anuales por celda se utilizaron dos bases de datos del Global Precipitation Climatology Center (GPCC).³⁷ La primera, llamada “producto de monitoreo” (*Monitoring product*), de acceso libre, se basa en datos de calidad controlada de unas 7.000 estaciones de monitoreo; contiene datos asociados a rejillas de cobertura global con resoluciones de 2,5 y 1 grados, desde 1986 hasta el presente. La segunda, conocida como “GPCP Versión 2 Combined Precipitation Data Set”, contiene estimaciones de las precipitaciones basadas en la combinación de mediciones y observaciones por satélite, así como el error de dicha estimación, con una resolución de 2,5 grados.

c) Emisiones de fondo

Para el cálculo de las concentraciones de SO₂, NO_x, sulfatos y nitratos en todas las celdas del dominio, el WTM utiliza como datos de entrada las emisiones naturales y antropogénicas de SO₂, NO_x y NH₃. Las emisiones de SO₂ y NO_x se obtuvieron de la base de datos global EDGAR,³⁸ que tiene información del año 2000, con una resolución de un grado. En esta base de datos las emisiones se reportan clasificadas en 81 sectores resultantes de subdividir los siguientes grupos de fuentes: combustibles fósiles, incluyendo tráfico marítimo y aéreo; biocombustibles; procesos industriales; agricultura, uso de la tierra incluyendo quema intensa de biomasa; uso y producción de compuestos halocarbonados y gases fluorados; tratamiento de desechos, y otras fuentes antropogénicas no incluidas en los grupos anteriores.

Los datos se descargan como archivos de texto, uno para cada sector, que contienen información de la ubicación: longitud y latitud y la emisión clasificada en alta o baja. Se estimó que las emisiones provenientes del tráfico aéreo y las provenientes de generación eléctrica son emisiones altas (en realidad, aquellas emitidas a más de 100 m de altura), mientras que el resto de éstas se consideran bajas.

Las emisiones de NH₃ se obtienen a partir de dos bases de datos de cobertura global.^{39 40} La primera tiene una resolución de medio grado e incluye las emisiones de 1995 sólo para fertilizantes inorgánicos y desechos de animales, los dos sectores cuya contribución es la más relevante en cuanto a emisiones de NH₃. Las emisiones correspondientes a otros sectores se extraen de la segunda de estas bases de datos, de un grado de resolución, que incluye emisiones para 1990 clasificadas en sectores de los que se excluyen los anteriormente mencionados.

³⁷ The Global Precipitation Climatology Centre (<http://www.dwd.de/research/gpcc>).

³⁸ EDGAR emission data base (<http://arch.rivm.nl/env/int/coredata/edgar.html>).

³⁹ NH₃ International Emission Inventory (<http://arch.rivm.nl/databases/nh3>).

⁴⁰ GEIA (Global Emissions Inventory Activity) (<http://www.rivm.nl/geia/data/Ammonia>).

El valor de concentración de fondo de ozono troposférico utilizado en este estudio es de 40 ppb: se seleccionó con base en la referencia ⁴¹ y las implementaciones del WTM en Europa y el Sudeste Asiático. El valor seleccionado para la concentración de fondo de radicales OH, de 1 300 000 moléculas/cm³, corresponde a la concentración a 20° de latitud, que es el paralelo central del dominio de estudio. ⁴²

C. INVENTARIO DE EMISIONES DE MÉXICO

Las emisiones de SO₂, NO_x y NH₃ sobre México fueron actualizadas utilizando el Inventario nacional de emisiones de México de la SEMARNAT ⁴³ del año 1999. Para ello se procesó con un SIG la capa de municipios de México, incorporándole campos con los valores de las emisiones de cada contaminante. Sobre estos valores se realizaron las siguientes modificaciones en los municipios donde se ubican las 12 mayores centrales termoeléctricas y las seis refinerías del país: 1) para las refinerías se consideran las emisiones que señala el inventario de 2004 del informe de PEMEX, y 2) para las 12 centrales termoeléctricas analizadas previamente se empleó el inventario de emisiones que reporta la Secretaría de Energía para 2004.

Se clasificaron las emisiones en altas y bajas en función de la altura de las chimeneas reportadas para cada unidad de las termoeléctricas; todas las emisiones provenientes de refinerías fueron identificadas como bajas. Para las centrales carbo-eléctricas (Río Escondido y Carbón II) se utilizó el inventario de SEMARNAT, a raíz de que había un problema con el reporte de NO_x en los cálculos de SENER para el año de referencia. Las emisiones de ambas centrales resultaron altas.

Los municipios de Tula y Salamanca incluyen únicamente las emisiones de SO₂ provenientes de la central termoeléctrica y de la refinería para el año 2004, según fueron calculadas para el estudio.

Para las emisiones de NO_x en Salamanca se utilizó el criterio anterior, en tanto que en Tula se tomaron en cuenta 10 000 toneladas para la refinería, más lo reportado en 1999 para la termoeléctrica. Al sustituir estos valores por los reportados para el año 2004, se dejó el remanente del inventario para contemplar otras fuentes en el área. En los municipios de Madero, Salina Cruz y Cadereyta se consideró sólo la emisión de la refinería.

En el gráfico 4 se muestran las emisiones altas de SO₂ y NO_x actualizadas a la base de datos. Se aprecia que las únicas emisiones altas son las de algunas centrales termoeléctricas que descargan a chimeneas que sobrepasan los 100 m de altura.

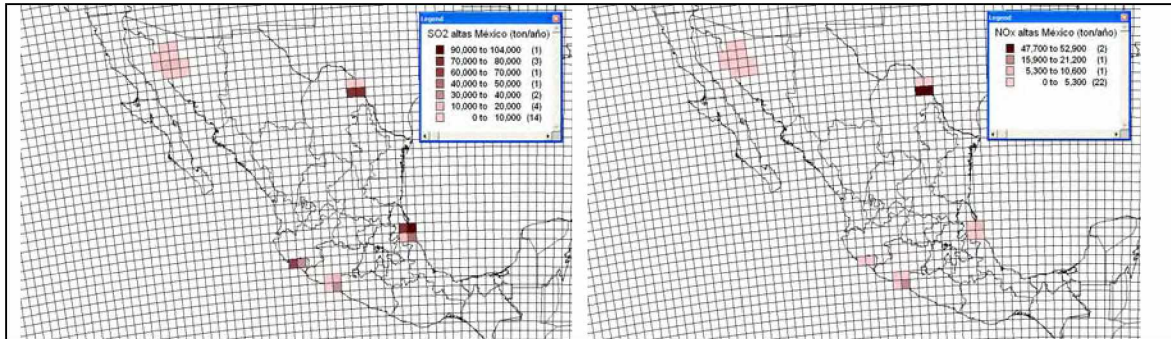
⁴¹ Logan (1999).

⁴² Spivakovsky y otros (2000).

⁴³ SEMARNAT (2006b), *Inventario Nacional de Emisiones*.

Gráfico 4

**MÉXICO: EMISIONES ALTAS DE SO₂ Y NO_x
ACTUALIZADAS A LA BASE DE DATOS**

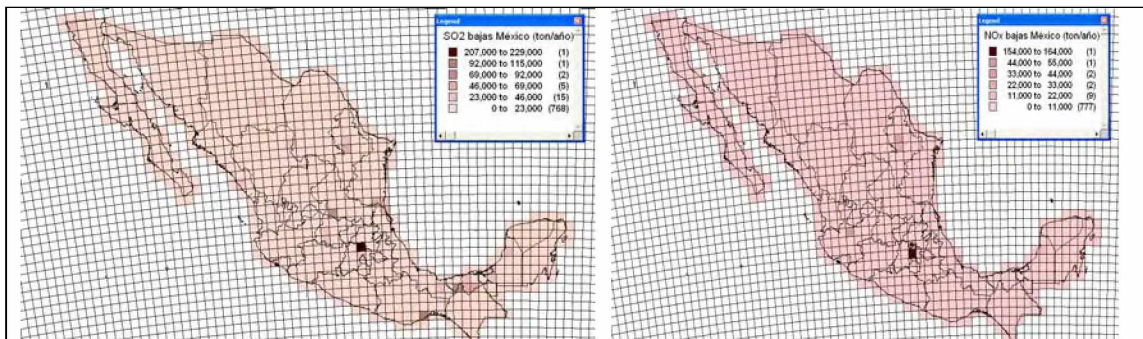


Fuente: Elaboración propia con base en el Inventario Nacional de Emisiones de México.

En el gráfico 5 se aprecian las emisiones bajas para SO₂ y NO_x. Las centrales termoeléctricas constituyen la fuente más importante para ambos contaminantes; la mayor parte de los valores que resaltan sobre la media tienen este origen.

Gráfico 5

**MÉXICO: EMISIONES BAJAS DE SO₂ Y NO_x
ACTUALIZADAS A LA BASE DE DATOS**



Fuente: Elaboración propia con base en el Inventario Nacional de Emisiones de México.

D. FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA CONSIDERADAS

Para la selección de las funciones exposición-respuesta se revisaron estudios epidemiológicos disponibles en México, así como investigaciones internacionales de referencia. Entre ellos se seleccionaron los valores de Incremento del Riesgo Relativo en número de casos para un aumento en la concentración de un contaminante específico, tanto para morbilidad como para mortalidad. En

el caso de la morbilidad, a partir de dichos incrementos y considerando las tasas de incidencia, fracciones de población y grupos de riesgo en México, se determinaron las pendientes de las funciones exposición–respuesta. Por lo que se refiere al impacto en mortalidad, a partir de las estadísticas de mortalidad y fracción de la población por grupos de edades de México se determinó la pérdida de expectativa de vida por la exposición prolongada a PM_{10} , en función del incremento de riesgo reportado en los trabajos. A continuación se presenta la información utilizada.

1. Tasas de Incremento de Riesgo Relativo

Para la selección de los valores de Incremento de Riesgo Relativo (IRR) se emplearon dos meta-análisis y un estudio independiente. El primero de ellos es el meta-análisis realizado en el marco del proyecto Ecosistema Urbano y Salud de los Habitantes de la Zona Metropolitana del Valle de México, revisado y publicado por el Banco Mundial.⁴⁴ De este estudio se tomaron los valores de IRR para evaluar el impacto de partículas, y a partir de ellos se derivaron los correspondientes a sulfatos y nitratos, siguiendo los últimos criterios de ExternE 2005 sobre toxicidad para los contaminantes secundarios, que calcula la toxicidad de los sulfatos igual a la de las partículas PM_{10} y la de los nitratos igual a la mitad, como se explicó en el primer capítulo.

Del segundo meta-análisis,⁴⁵ elaborado por Stieb y otros (2002), se obtuvo el valor de IRR para la mortalidad aguda por SO_2 ; este meta-análisis evaluó 109 estudios llevados a cabo en todo el mundo, incluido México. Para el caso de las admisiones hospitalarias por SO_2 , fue usado el estudio de Spix y otros (1998),⁴⁶ al no contar con un meta-análisis. En el cuadro 5 se exponen los valores de IRR utilizados en el estudio.

2. Tasas de incidencia y de mortalidad

Las tasas de incidencia para el estudio y las fracciones de la población para cada padecimiento se muestran en el cuadro 6. La información de tasas de incidencia proviene del Sistema Nacional de Información en Salud⁴⁷ (SINAIS) —administrado por la Secretaría de Salud— y se refiere a los impactos en los que se consiguieron datos con la desagregación necesaria. Para los casos en que esto no fue posible, se utilizó la tasa basal estimada para la Zona Metropolitana del Valle de México, ya que se consideró preferible frente a la de otros países. Los datos de población son los reportados por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI).

⁴⁴ César y otros (2002). Este meta-análisis incluyó 126 estudios epidemiológicos y da un mayor peso a los resultados de México.

⁴⁵ Stieb y otros (2002).

⁴⁶ Spix y otros (1998).

⁴⁷ Acerca del SINAIS. <http://www.salud.gob.mx/unidades/dgied/sinais/acercade.htm>.

Cuadro 5

INCREMENTO DE RIESGO RELATIVO (IRR)

(%/µg/m³)

Efecto	Grupo de población en riesgo	IRR a/ para PM10	IRR para SO2
Bronquitis crónica	Mayores de 30 años	0,360	-
Días de actividad restringida	Adultos	0,774	-
Ingresos hospitalarios, respiratorios	Población total	0,139	0,040 b/
Ingresos hospitalarios, cardiovasculares	Adultos mayores de 65 años	0,060	-
Visitas a salas de urgencia (respiratorias)	Población total	0,311	-
Crisis aguda de asma	Asmáticos	0,774	-
Mortalidad por exposición aguda	Población total	-	0,034 c/
Mortalidad por exposición crónica	Adultos mayores de 30 años	0,384	-

Fuente: a/ César y otros (2002); b/ Spix y otros (1998), y c/ Stieb y otros (2002).

3. Funciones exposición–respuesta para mortalidad estimadas con el enfoque de pérdida de expectativa de vida

Para evaluar la mortalidad crónica, Leksell y Rabl ⁴⁸ desarrollaron una metodología que estima la pendiente de la función exposición–respuesta para la mortalidad asociada a la contaminación atmosférica (S_{FER}) en Años de Vida Perdidos (AVP/(persona-año-µg/m³)), a partir del Riesgo Relativo reportado en los estudios de cohorte y la pérdida de la expectativa de vida asociada a dicho riesgo. Dicha metodología se aplicó al caso de México, con la asesoría de Spadaro en el marco de este estudio, considerando un análisis de tipo estático. ⁴⁹

⁴⁸ Leksell y Rabl (2001).

⁴⁹ Spadaro, comunicación personal. La metodología completa desarrollada por Leksell y Rabl considera un factor para medir el decremento del riesgo, una vez que se termina la exposición, con base en los resultados obtenidos en estudios con población fumadora, en un enfoque dinámico. De acuerdo con Spadaro, el enfoque estático es aceptable ante la complejidad del análisis dinámico, pues el valor obtenido tiene una precisión del orden de 15%, que es menor a otras incertidumbres asociadas.

Cuadro 6

TASA DE INCIDENCIA Y FRACCIONES DE POBLACIÓN

(Casos-persona-año/fracción del total)

Efecto	Grupo de población en riesgo	Tasa de incidencia (casos-persona-año)	Fracción de la población d/
Bronquitis crónica	≥ 30 años	0,00700 a/	0,410
Días de actividad restringida	Adultos	6,46000 a/	0,540
Ingresos hospitalarios (respiratorios)	Población total	0,00260 b/	1,000
Ingresos hospitalarios (cardiovasculares)	≥ 65 años	0,00210 b/	0,050
Visitas a salas de urgencia (respiratorias)	Población total	0,03200 a/	1,000
Crisis aguda de asma	Asmáticos	0,12740 a/	0,056 e/
Mortalidad aguda	Población total	0,00448 c/	1,000
Mortalidad crónica	≥ 30 años	0,00936 c/	0,410

Fuente: a/ César y otros. *Improving Air Quality in Metropolitan Mexico City*, WB, 2002; b/ Secretaría de Salud, SINAIS, Sistemas Automatizados de Egresos Hospitalarios, México, 2005a; c/ Secretaría de Salud, SINAIS, *Mortalidad 2004*, México, 2005b; d/ INEGI, *Población total por grupos quinquenales de edad según sexo, 1950 a 2005*, México, 2006; e/ El porcentaje total de población con asma se estimó considerando 5% de adultos y 8% de niños, de acuerdo con estimaciones del Instituto Nacional de Enfermedades Respiratorias.

En términos generales, la metodología estima la pendiente de la función exposición-respuesta a partir de la siguiente ecuación:

$$S_{FER} = F_l \bullet \frac{\Delta T_L}{T_L \Delta C} \text{ AVP}/(\text{persona-año-}\mu\text{g}/\text{m}^3) \quad [4]$$

donde: F_l : factor de ajuste que considera el retraso entre la exposición y el impacto en la población potencialmente en riesgo, así como la capacidad de autorecuperación del cuerpo humano después de una exposición. Se le denomina “factor de latencia”. Como el grupo de riesgo para esta función es la población mayor de 30 años, generalmente se asume el valor de este parámetro cercano a dicha fracción de la población, 0,6 para Europa, 0,41 para México.

T_L , es la expectativa de vida de la población; se expresa en años.

ΔT_L , es la pérdida de expectativa de vida por una exposición crónica; se expresa en Años de Vida Perdidos (AVP).

ΔC , es la variación en la concentración del contaminante para la cual se estimó el Riesgo Relativo RR, se expresa en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La expectativa de vida de la población (T_L) se estima a partir de las estadísticas de mortalidad y de la fracción de la población por grupos quinquenales de edades en México,

reportadas por la Secretaría de Salud y el INEGI,⁵⁰ considerando un Riesgo Relativo igual a la unidad y aplicando las funciones de probabilidad de supervivencia y de determinación de expectativa de vida⁵¹ para el caso de México. Esta estimación dio como resultado una expectativa de vida de 75,2 años, valor semejante al valor oficial reportado para el año 2004.

Una vez que se ha estimado la expectativa de vida de la población, se calcula la expectativa de vida asociada a una exposición crónica a la contaminación atmosférica. Para ello se utilizó un Valor de Riesgo Relativo que considera el incremento en el riesgo asociado a un aumento en la concentración de PM_{10} en el aire ($RR = 1 + IRR$). El Incremento de Riesgo Relativo considerado fue de 3,84% por un aumento de $10 \mu g/m^3$ en la concentración ambiente de PM_{10} , valor que corresponde al reportado por César y otros (2002) (véase el cuadro 5). La expectativa de vida considerando la exposición disminuye a 74,7 años. Por lo tanto, la pérdida de expectativa de vida, ΔT_L , resulta ser de 0,45 Años de Vida Perdidos (AVP). Aplicando la ecuación [4] se encuentra que la pendiente de la función exposición–respuesta para mortalidad por exposición crónica para mayores de 30 años a PM_{10} es de $2,49E-04$ AVP/(persona-año- $\mu g/m^3$).

Para evaluar la mortalidad por exposición aguda a SO_2 , se utiliza el IRR del estudio de Stieb y otros (2002) y se establece, al igual que ExternE, que una muerte por exposición aguda equivale a 0,5 AVP. Así, $S_{FER} = IRR \cdot I_{ref} \cdot 0,5$ AVP/(persona-año- $\mu g/m^3$).

4. Resumen de funciones exposición–respuesta aplicadas en el estudio

Con la información de IRR del cuadro 5, las tasas de incidencia y fracciones de población presentadas en el cuadro 6, así como la aplicación de la metodología para la estimación de la pendiente de la mortalidad en Años de Vida Perdidos, se calcularon las pendientes de las funciones exposición-respuesta. En el cuadro 7 se presentan las funciones que se aplicaron para la determinación de las externalidades.

⁵⁰ INEGI/Secretaría de Salud (2005).

⁵¹ La función de probabilidad de supervivencia y la determinación de expectativa de vida se calculó utilizando la herramienta programada por Spadaro y consultores de la CEPAL.

Cuadro 7

FUNCIONES EXPOSICIÓN-RESPUESTA

(Morbilidad: casos-persona-año/Mortalidad: Años de Vida Perdidos)

Funciones exposición-respuesta	Pendiente (casos/(año-receptor- $\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	PM ₁₀ y sulfatos	Nitratos	SO ₂
Bronquitis crónica (adultos mayores de 30 años)	1,03E-05	5,16E-06	
Admisiones hospitalarias respiratorias (población total)	3,61E-06	1,81E-06	1,04E-06
Días de actividad restringida (adultos entre 20 y 65 años)	2,70E-02	1,35E-02	
Visitas a salas de urgencia (población total)	9,95E-05	4,98E-05	
Crisis aguda de asma (asmáticos)	5,50E-05	2,75E-05	
Admisiones hospitalarias cardiovasculares (adultos mayores de 65 años)	6,30E-08	3,15E-08	
Mortalidad crónica (adultos mayores de 30 años)	2,46E-04	1,23E-04	
Mortalidad aguda a/ (población total)			7,62E-07

Fuente: Elaboración propia con base en la información presentada en los cuadros 5 y 6.

a/ La función de mortalidad aguda se aplica únicamente a SO₂; considera que una muerte aguda equivale a seis meses de vida perdidos.**E. COSTOS ECONÓMICOS****1. Morbilidad**

Como se explicó en el capítulo I, los costos de los casos de morbilidad incluyen los costos directos de la enfermedad, la pérdida de productividad y la Voluntad a Pagar.

El costo directo de enfermedad utilizado corresponde al nivel III de atención (el más completo) del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), estimado por el Instituto Nacional de Ecología y el Instituto Nacional de Salud Pública, en el marco del estudio *The Local Benefits of Global Air Pollution Control in Mexico City*.⁵² Los valores presentados en dicho estudio se encuentran en dólares de 2001 y fueron actualizados a dólares de 2004.⁵³ El costo directo de enfermedad (costo del tratamiento) se halla altamente influido por las condiciones propias del lugar en que se brindan los servicios médicos y por aspectos socioeconómicos de la población atendida, por lo que, como se señaló en el estudio anterior, es deseable realizar estimaciones directas en las zonas de estudio.

⁵² McKinley y otros (2003).

⁵³ Se utilizaron para la actualización los factores de conversión de la Universidad de Oregon (C. Sahr, 2006).

La pérdida de productividad se calculó sobre la base de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares, y del salario mínimo general promedio nacional para 2004.⁵⁴ Se tomó en cuenta un salario mínimo de 43,30 pesos diarios y 4,48 salarios mínimos como promedio de ingreso de los hogares, por lo que un día de trabajo perdido se valoró en 194 pesos. El número de días perdidos por enfermedad fue el utilizado por ExternE, excepto para la bronquitis crónica, en cuyo caso se redujo a siete días, con base en el estudio de César y otros (2002). Se ajustó también el valor de los días perdidos por ingresos hospitalarios cardiovasculares, a la mitad de un día (87 pesos), para considerar que el grupo de riesgo es la población mayor de 65 años.

Finalmente, al no contar con estimados de VAP para efectos de morbilidad, se transfirieron de ExternE 2005, ajustando por relación de ingresos entre México y la Unión Europea.⁵⁵ El coeficiente de transferencia resultó de 0,37, considerando el producto interno bruto (PIB) en Paridad del Poder Adquisitivo reportado por el Banco Mundial⁵⁶ para 2004; se consideró una elasticidad ingreso igual a 1. En el cuadro 8 se resumen los costos utilizados para cada caso.

2. Mortalidad

Para valorar los casos de mortalidad se utilizó el Valor Estadístico de la Vida estimado para México por James Hammit (Harvard University) y María Eugenia Ibarrarán (Universidad de las Américas, Puebla) en el estudio *The Economic Value of Fatal and Non-Fatal Occupational Risks in Mexico City Using Actuarial and Perceived Risk Estimates (Estimando el valor económico de reducir los riesgos en salud en la Ciudad de México: Diferencial en compensaciones salariales)*, que fue publicado en agosto de 2006.⁵⁷ Este estudio, primero en su clase en el país, estimó el VEV para México en un rango de 235 000 y 325 000 dólares (de 2002), mediante el método de compensaciones salariales. Se considera en el estudio el valor central de 280 000 dólares (de 2002), que actualizado a 2004 es de 293 933 dólares. Con esta metodología basada en riesgos ocupacionales el VEV generalmente es un estimado bajo.

Este estimado es más bajo que el VEV que se obtiene en países desarrollados pero comparable con estudios llevados a cabo en países en desarrollo. Sin embargo, como ya se señaló, existen actualmente algunos cuestionamientos al método de compensaciones salariales, particularmente para su aplicación en medidas de control ambiental. Por ello es conveniente contar en el futuro con estudios que utilicen la técnica de valoración contingente⁵⁸ en el país, con el fin de verificar su consistencia y disponer de un estimado central más robusto. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), por ejemplo, determinó

⁵⁴ INEGI (2005).

⁵⁵ Se aclara que el estudio de McKinley presenta valores de VAP, pero los mismos corresponden a una transferencia de costos de ExternE 1999, por lo que se decidió utilizar la última actualización de ExternE 2005.

⁵⁶ Banco Mundial (2006).

⁵⁷ El estudio fue financiado por la Comisión Ambiental Metropolitana, y es parte de los trabajos que coordina el Instituto Tecnológico de Massachussets bajo el proyecto: *MIT Integrated Program on Urban, Regional and Global Air Pollution: Mexico City Case Study*.

⁵⁸ Los mismos autores realizaron un estudio aplicando la valoración contingente, cuyo resultado preliminar, aún en revisión, arrojaba un valor de 506 000 dólares; este valor fue considerado para estudios de sensibilidad en el estudio anterior de externalidades de termoelectricas.

un valor de 4,8 millones de dólares (1990) tras una revisión de 26 estudios, cinco de ellos basados en estudios de valoración contingente.

Cuadro 8
COSTOS UNITARIOS PARA CASOS DE MORBILIDAD
(Dólares de 2004)

Efecto	Costos de enfermedad a/	Pérdida de productividad b/	Voluntad a Pagar c/	Total
Bronquitis crónica	18 941	127	80 188	99 256
Ingresos hospitalarios				
Respiratorios	2 336	145	188	2 669
Cardiovasculares	11 621	73	188	11 882
Visitas a salas de urgencia respiratorias	288	91	97	476
Crisis aguda de asma	338	18	87	443
Días de actividad restringida		18	20	38

Fuente: a/ McKinley, y otros, 2003 (ajustado a dólares de 2004). b/ Se estimó un valor de 194 pesos por día laboral perdido equivalente a 18 dólares de 2004; el número de días perdidos es de 1 para las crisis agudas, 5 para visitas a salas de urgencia respiratoria y 8 para un ingreso hospitalario de acuerdo con ExternE 2005, y 7 para una bronquitis crónica de acuerdo con César y otros, 2002. c/ La VAP es transferida de ExternE 2005, con datos del Banco Mundial, World Development Indicators database, 2006.

En el cuadro 9 se presenta con fines comparativos el VEV estimado para México y los que se obtendrían de transferir el valor de otros países utilizando la relación de poder adquisitivo entre el PIB del país de referencia y México en PPP.

Con el fin de valorar la mortalidad en Años de Vida Perdidos en lugar de número de muertes, en el marco del presente estudio se determinó el Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP), con base en el VEV estimado por Hammit-Ibarrarán para México y en la metodología propuesta por Spadaro.⁵⁹ En el cuadro 10 se muestran los valores obtenidos para México, y con fines comparativos los que se obtendrían de transferir el VAVP del Proyecto ExternE. Se puede apreciar que en este caso, la transferencia de costos da valores muy cercanos a los estimados para México, los cuales se utilizaron para estimar los impactos asociados a mortalidad crónica y aguda.

⁵⁹ Spadaro (1999).

Cuadro 9

VALOR ESTADÍSTICO DE LA VIDA PARA MÉXICO (VEV)

(Dólares de 2004)

Referencia	VEV\$ ₂₀₀₄
Estimado en México a/	293 933
Transferencia de la Unión Europea b/	367 894
Transferencia de Estados Unidos c/	1 679 507

Fuente: a/ Hammit-Ibarrarán (2006); b/ ExternE 2005 transferido a México con un factor de 0,37; c/ US Environmental Protection Agency (s/f), *The Benefits and Costs of the Clean Air Act 1990 to 2010*, transferido a México con un factor de 0,24. Los factores de transferencia se calcularon con base en datos del Banco Mundial, *World Development Indicators database*. Cifras actualizadas a dólares de 2004.

Cuadro 10

VALOR DE UN AÑO DE VIDA PERDIDO PARA MÉXICO (VAVP)

(Dólares de 2004)

	Estimado propio a/	Transferido de ExternE b/
VAVP _{AGUDO}	22 917	26 228
VAVP _{CRONICO}	13 327	17 485

Fuente: a/ Estimación propia con base en la metodología de Spadaro, 1999 y al valor de Hammit-Ibarrarán, 2006; b/ ExternE 2005 transferido con un factor de 0,37 con base en datos del Banco Mundial, *World Development Indicators database*.

3. Otros impactos

Para valorar el impacto en el cambio climático se consideró el costo de reducir emisiones para México, tomando como base el potencial de reducción de emisiones (PRE) y el costo neto por tonelada de CO₂ evitada por año. La información se obtiene del documento *Hacia una estrategia nacional de acción climática*, elaborado por la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático de México y el Centro Mario Molina.⁶⁰ Se estima que en un escenario de penetración tecnológica intermedia podría tenerse un potencial de mitigación de 98,6 millones de toneladas de CO₂ al año. Los costos de reducción de los proyectos evaluados⁶¹ se estiman entre 0,66 y 274 dólares, con una media de 18 dólares por tonelada. Se tomará como referencia este valor en la determinación de externalidades, que es semejante al que considera ExternE.

⁶⁰ SEMARNAT (2006a).

⁶¹ Existen proyectos que reportan un beneficio económico en adición a la reducción de emisiones y no un costo (proyectos del tipo *no regrets*).

En el cuadro 11 se muestran las emisiones de GEI consideradas en el estudio.

Cuadro 11

ZONAS DE TULA Y SALAMANCA: EMISIONES DE CO₂
DEL SECTOR ENERGÍA

(Millones de toneladas)

	Refinación a/	Electricidad b/	Total
Salamanca	2,47	2,23	4,70
Tula	3,31	6,81	10,12
Total	5,78	9,04	14,82

Fuente: a/ PEMEX (2005a), *Informe 2004*. Desarrollo Sustentable. México.

b/ Secretaría de Energía (2004), *Emisiones Sector Eléctrico*
(www.energia.gob.mx).

El impacto en ecosistemas no fue valorado por no disponer de valores de referencia aplicables a México. La determinación del valor del Proyecto ExternE se basó en curvas de costo marginal de mitigación y niveles definidos en programas regionales europeos⁶² para protección de ecosistemas, y no puede ser aplicado al país.

⁶² Por ejemplo, la meta de reducción consideró el Protocolo de Gotemburgo sobre contaminación transfronteriza (*Protocol of Gothenburg on the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution*) y la Directiva Europea 2001/81/EC (*National Emission Ceilings for some air pollutants NEC*), que define techos de emisión de contaminantes para detener la acidificación y eutrofización de ecosistemas en Europa.

III. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación de la metodología para evaluar los costos externos en las zonas estudiadas. Se analizan la dispersión de los contaminantes en cada una de las zonas y las concentraciones resultantes, considerando las normas oficiales mexicanas (NOM) de la Secretaría de Salud y, finalmente, los resultados de las externalidades, desglosado por tipo de contaminante para la refinación de petróleo y para la generación de electricidad, así como en forma conjunta.

A. DISPERSIÓN Y CONCENTRACIÓN DE LOS CONTAMINANTES

1. Calidad del aire en el dominio local

Por las características del modelo utilizado (AERMOD), la modelación de cada uno de los contaminantes es independiente de los demás. El modelo permite agrupar puntos de emisión de forma, que se puede analizar en una misma corrida la contribución de cada grupo en el resultado total. Así, se definieron tres grupos de fuentes: planta termoeléctrica, quemadores de la refinería y el resto de las fuentes de la refinería; la contribución de la refinería es la suma de los resultados de estos dos últimos grupos.

De esta manera fue posible distinguir, al analizar la dispersión de los contaminantes atmosféricos, la aportación de cada una de las instalaciones (la refinería y la planta termoeléctrica) a las concentraciones totales de contaminantes estimadas tanto en la zona de Tula, como en Salamanca.

El modelo también permite evaluar la concentración promedio para cualquier período que defina el usuario. La definición se hizo con base en las normas oficiales mexicanas de la Secretaría de Salud, que establecen las concentraciones máximas de los contaminantes considerados (SO_2 , NO_x y PM_{10}) para tener una calidad del aire aceptable.

En el caso del SO_2 , la NOM-022 vigente a la fecha establece que la concentración promedio de 24 h debe ser menor de $341 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para proteger la salud de la población y el promedio anual menor de $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El NO_x se expresa como NO_2 ; respecto de las concentraciones de este contaminante, la norma oficial mexicana de salud establece un valor de $395 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio horario, valor que no debe excederse más de una vez al año; el valor guía de la EPA es de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el promedio anual, valor que se tomó como referencia para este período.

Para el caso de PST y PM_{10} se tomaron como referencia los valores establecidos en las normas de la Secretaría de Salud, que contempla valores promedio de 24 h y de un año, vigentes a la fecha. En el cuadro 12 se muestran los valores normados en México para los contaminantes

bajo estudio, indicando en cada caso el valor límite de concentración en un tiempo promedio y la frecuencia máxima aceptable de exposición. Con el fin de analizar incidencias en las normas, se estimó la concentración promedio para estos contaminantes en los períodos de referencia y se comparó con los valores de las NOM.

En el cuadro 13 se presenta un resumen de las emisiones contaminantes consideradas para los estudios de dispersión.

Cuadro 12

MÉXICO: VALORES NORMADOS PARA CONTAMINANTES DEL AIRE

(SO₂, NO₂ y partículas)

Contaminante	Valores límite			Normas Oficiales Mexicanas
	Exposición aguda		Exposición crónica	
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	Concentración y tiempo promedio	
Bióxido de azufre (SO ₂)	0,13 ppm (341 µg/m ³) 24 horas	1 vez al año	0,03 ppm (79 µg/m ³) promedio aritmético anual	NOM-022-SSA1- 1993
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)*	0,21 ppm (395 µg/m ³) 1 hora	1 vez al año	a/	NOM-023-SSA1- 1993
Partículas suspendidas totales (PST)	210 µg/m ³ (24 horas)	2% de mediciones en un año	-	Modificación a la NOM-025-SSA1- 1993
Partículas menores de 10 micrómetros (PM ₁₀)	120 µg/m ³ (24 horas)	2% de mediciones en un año	50 µg/m ³ (promedio aritmético anual)	

Fuente: Elaboración con base en las Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Salud.

a/ Para evaluar la concentración anual de NO₂ se consideró como referencia la norma de la EPA, 100 µg/m³ o 0,053 ppm.

Cuadro 13

EMISIÓN DE CONTAMINANTES CONSIDERADOS PARA LA DISPERSIÓN

(Toneladas/año)

Zona	Refinería				Termoeléctrica	
	SO ₂	NO _x	PST	SO ₂	NO _x	PST
Tula	110 799	4 925	7 834	108 357	20 225	6 906
Salamanca	46 115	3 377	3 350	38 303	3 938	2 999

Fuente: Elaboración propia con base en datos proporcionados por PEMEX y CFE.

a) Zona de Tula

Para el caso de SO_2 , la concentración promedio anual estimada por el modelo para el dominio local sobrepasa el valor establecido por la norma de calidad del aire ($79 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en 196 receptores dentro del dominio, los cuales comprenden un área de 784 km^2 y se excede el doble de ese valor en 85 receptores (340 km^2). En algunos puntos del dominio local se tienen valores estimados de concentración promedio anual que superan en más de 10 veces el valor correspondiente a la norma de calidad del aire.

Se encuentra también que en 12 160 días-receptor se excede el promedio de 24 h que establece la citada norma de salud de $340 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y 4 100 días-receptor se ubican por encima del doble de ese valor, de $680 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

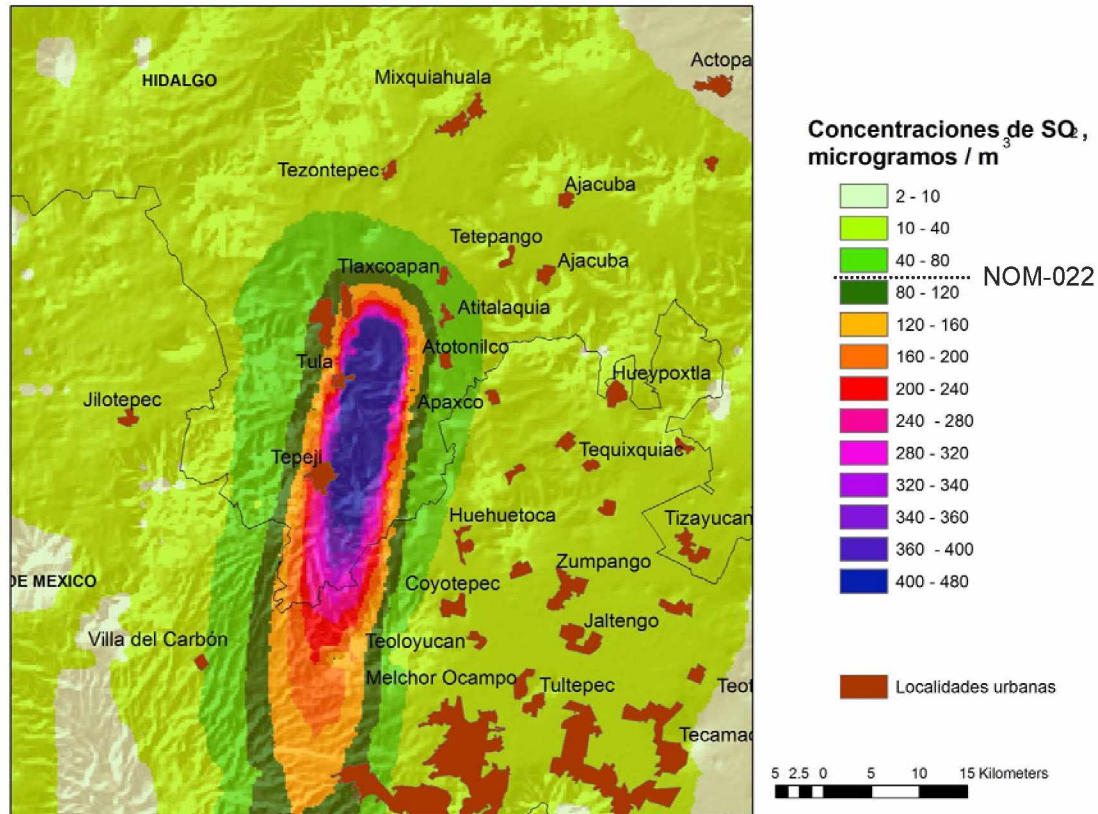
Se hizo una corrida del modelo de dispersión, extendiendo el dominio local hacia el sur en 10 km más allá de los 50 km, con el fin de tener una estimación preliminar de la influencia de las emisiones de las instalaciones evaluadas en la parte norte de la Zona Metropolitana del Valle de México. El resultado se muestra en el gráfico 6. Para una evaluación precisa en la zona ampliada, sería necesario aplicar un modelo de alcance medio, como el CALPUFF. Cabe precisar que para la determinación de las externalidades se tuvo en cuenta únicamente el dominio local regular de $100 \times 100 \text{ km}$, como establece la metodología.

Con las emisiones consideradas, las concentraciones promedio estimadas para PM_{10} y NO_2 en el dominio local están, en lo general, dentro de los valores de norma y presentan muchas menos excedencias a las normas de salud que las de SO_2 . Para PM_{10} , la concentración promedio anual estimada por el modelo rebasa la especificada por la norma de salud en sólo 4 receptores; el valor máximo estimado es mayor que el valor de referencia en un factor de 2,6. La concentración diaria estimada sobrepasa el valor de referencia (260) sólo en dos receptores en todo el dominio, por un factor de 1,7 en el caso extremo. Para el NO_2 , la concentración promedio anual supera el valor de referencia (100) sólo en cinco receptores y es dos veces mayor en un receptor.

La contribución de las emisiones de la refinería a las concentraciones de SO_2 y PM_{10} es mayor que la de la planta térmica; para los NO_x , la contribución mayor es de la planta termoeléctrica. Sin embargo, la contribución de ésta para todos los contaminantes es ligeramente menor al porcentaje esperado si sólo se consideraran sus emisiones, posiblemente debido a la mayor altura de sus chimeneas y a la influencia de otros factores como la temperatura y velocidad de los gases de escape, que facilitan la dispersión de los contaminantes.

Gráfico 6

TULA: ISOLÍNEAS DE CONCENTRACIÓN PROMEDIO ANUAL DE SO₂
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



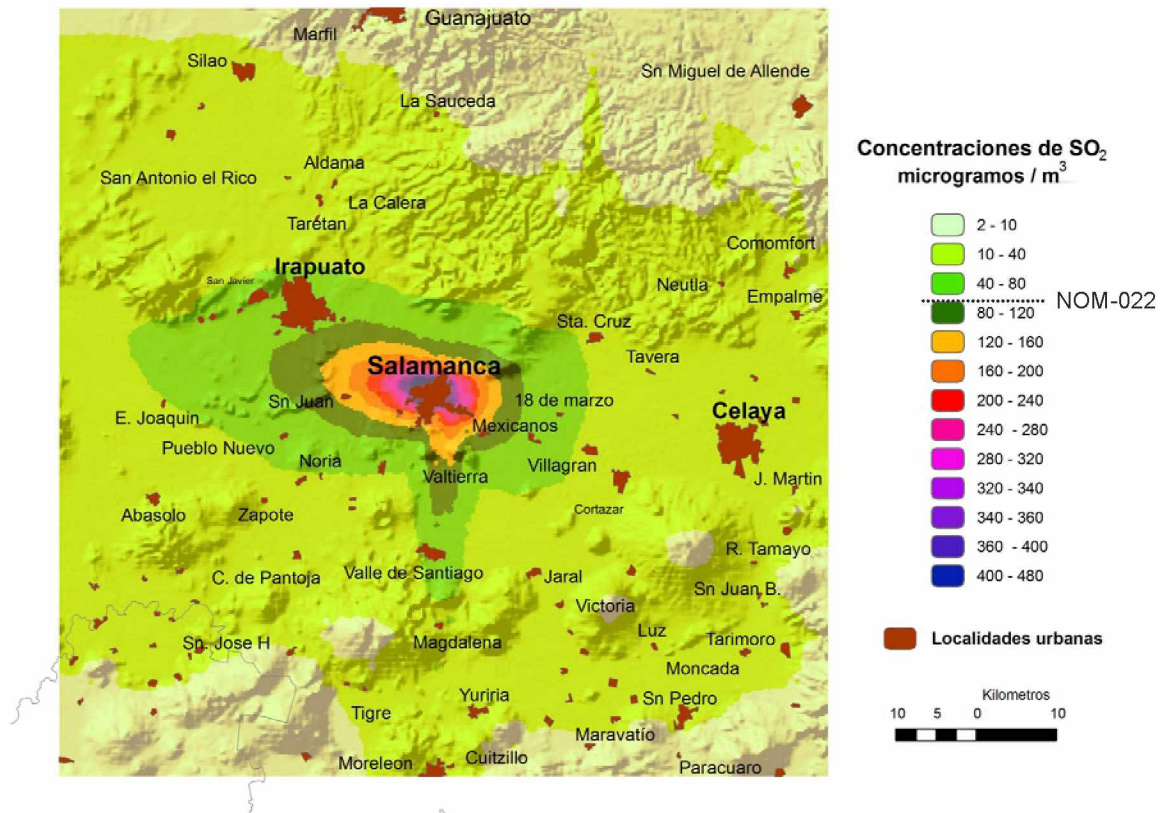
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo AERMOD.

b) Zona de Salamanca

Se modeló la dispersión local de los tres contaminantes (SO₂, NO_x y PM₁₀), considerando promedios anuales y de 24 h, al igual que para Tula. Para el SO₂, la concentración promedio anual rebasa el valor de referencia ($79 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en un total de 106 receptores de los 2 500 evaluados, que representa un área de 424 km^2 y en 29 receptores (116 km^2) se excede el doble de ese valor. En el gráfico 7 se muestran las isolíneas de concentración promedio anual estimadas.

Gráfico 7

SALAMANCA: ISOLÍNEAS DE CONCENTRACIÓN PROMEDIO ANUAL DE SO₂
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo AERMOD.

El valor máximo encontrado en algún punto del dominio excede en más de cinco veces el valor de referencia. La concentración promedio diaria estimada en todo el dominio rebasa el valor de referencia ($341 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en 87 de los 2 500 receptores al menos un día del año; sólo 1 803 valores del total de promedios diarios calculados exceden el valor de referencia, lo que representa un 0,2%. Con las emisiones consideradas, las concentraciones de NO₂ y PM₁₀ en el dominio local no presentan excedencias respecto de los valores de referencia.

2. Calidad del aire en el dominio regional

a) Definición de casos de estudio

Como se mencionó, el dominio regional evaluado fue definido como una rejilla con origen en 120 Oeste, 5 Norte, que contiene 120x60 celdas de 55x55 km. Se definieron como receptores las celdas que se encuentran en un radio de 1 500 km de la fuente evaluada, rango típico de los estudios de dispersión regional. Como resultado de la modelación, se obtienen los niveles de concentración durante el año 2004 de SO₂, NO_x y PM₁₀, así como aerosoles de sulfato y nitrato, en cada celda definida como receptor.

Al igual que para el dominio local, se evaluó la dispersión regional de los contaminantes emitidos por cada una de las instalaciones mayores y para las dos instalaciones en su conjunto, tanto en Tula como en Salamanca. Como se mencionó, para evaluar una fuente en particular el procedimiento a seguir es correr el WMI dos veces: el “caso base”, sin tener en cuenta las emisiones de la fuente (o fuentes) que se desea estudiar, y el “caso real”, que incluye las emisiones del “caso base” más las emisiones propias de la fuente en estudio, y restar las concentraciones obtenidas para cada contaminante en el caso real respecto del caso base.

Lo anterior implicó analizar tres casos de estudio para cada zona: i) aportación de ambas fuentes en su conjunto (en el caso base la celda correspondiente a Tula no tiene emisiones de SO₂ y sólo existe una aportación de NO_x (15 000 ton/año) de otras fuentes); ii) análisis de la planta termoeléctrica; en el caso base la celda tiene las emisiones de SO₂ y NO_x de la refinería, además del NO_x de las otras fuentes, y iii) estudio de la refinería: en el caso base la celda tiene las emisiones de SO₂ y NO_x de la planta termoeléctrica, además del NO_x que se adjudica a las otras fuentes).

El caso base es muy importante en el análisis, ya que las emisiones de SO₂, NO_x y NH₃ tienen influencia directa en las emisiones de la fuente evaluada, es decir, en el caso real. Nótese que los procesos químicos que intervienen están gobernados por ecuaciones no lineales y la velocidad de reacción para la mayoría de los casos está relacionada con las concentraciones de los reactantes que intervienen. En el caso de las partículas, el modelo no abarca las interacciones químicas sino sólo su dispersión.

En Salamanca también se corrieron tres casos (planta termoeléctrica; refinería, y ambas). Las diferencias entre los casos están dadas por las emisiones de la celda donde se ubica Salamanca. No se consideran emisiones base en dicha celda cuando se evalúan ambas instalaciones; cuando se evalúa la planta térmica, las emisiones base son las de la refinería y viceversa.

En el cuadro se 14 resumen las diferentes corridas que se hicieron del modelo, incluyendo ambos casos, el base (que incluye emisiones de NH₃ y emisiones de fondo de NO_x) y el real. También se muestran los valores máximos de incremento de la concentración estimados para los contaminantes primarios y los aerosoles de sulfatos y nitratos, y el máximo decremento de aerosoles de nitrato, identificado como “mín”.

Cuadro 14

CASOS DE ESTUDIO, DATOS DE EMISIONES Y CONCENTRACIONES OBTENIDAS

Casos de estudio	Escenario	Emisiones, t/año				Concentraciones, $\mu\text{g}/\text{m}^3$					
		SO ₂	NO _x	PST	NH ₃	SO ₂	SO ₄ ²⁻	NO _x	NO ₃ ⁻	PST	
						Max	Max	Max	Min	Max	Max
1	Tula-todas	219 156	25 151	14 741	0	53,06	13,6		5,24	-0,76	0,7 3,51
1_base		0	15 000	0	9 636						
2	Tula-termo	108 358	20 225	6 906	0	26,23	6,44		4,22	-0,23	0,75 1,64
2_base		110 799	19 926	0	9 636						
3	Tula-refinería	110 799	4 926	7 834	0	26,83	6,62		1,04	-0,26	0,09 1,87
3_base		108 358	35 225	0	9 636						
4	Salamanca, todas	84 419	7 316	6 350	0	22,57	6,43		1,6	-0,05	0,67 1,68
4_base		0	0	0	6 099						
5	Salamanca, termo	38 303	3 938	2 999	0	10,24	2,86		0,87	-0,02	0,35 0,79
5_base		46 115	3 377	0	6 099						
6	Salamanca, refinería	46 115	3 377	3 350	0	12,33	3,45		0,74	-0,03	0,28 0,89
6_base		38 303	3 938	0	6 099						

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo WMI.

Como se desprende del cuadro 14, aun en el peor de los escenarios, en el caso del dominio regional no se llegan a presentar los elevados valores de concentración de los contaminantes que se encuentran en el dominio local, debido a que el modelo estima la concentración promedio en cada celda del dominio, que en este caso tiene una superficie de 3 025 km² (55*55 km), en tanto que en el dominio local se consideran celdas de 2*2 km. No obstante, los incrementos estimados de concentración de los contaminantes son muy significativos y además afectan a una gran población asentada en la gran extensión territorial que cubre el dominio regional.

Se observa una relación directa entre las emisiones de SO₂ y las concentraciones de SO₂ y SO₄²⁻, y entre las emisiones de NO_x y las concentraciones de NO_x. No se observa en lo general una relación directa entre las emisiones de NO_x y las concentraciones de NO₃⁻, las cuales dependen también de las emisiones de SO₂, tanto de la instalación que se analiza como de las emisiones base y, como se aprecia, pueden llegar a tener valores negativos.

b) Caso de estudio: emisiones de la refinería y la termoeléctrica de Tula

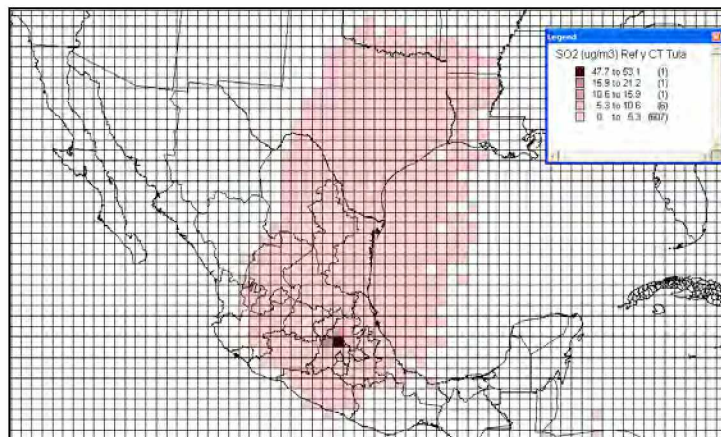
A manera de ejemplo se presentará una explicación general de los resultados obtenidos de las concentraciones al correr los modelos para el caso de Tula, con emisiones de las dos instalaciones en conjunto. Para evaluar ambas fuentes, el caso base considera en la celda de Tula emisiones de SO₂ nulas y de NO_x 15 000 t/año. Sobre esta base se añaden las emisiones totales: 219 156 t/año para SO₂, 25 151 t/año para NO_x y 14 740 t/año de PST.

En los gráficos 8 al 10 se aprecia el comportamiento de los contaminantes primarios, con concentraciones promedio anual máximas de $53,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para SO_2 , NO_x y PST, respectivamente. Se observa que en todos los casos la concentración disminuye rápidamente a la décima parte del valor máximo, en correspondencia con el comportamiento esperado para los contaminantes primarios. Las concentraciones obtenidas para SO_2 son relativamente elevadas debido a los altos niveles de emisión de este contaminante.

Gráfico 8

TULA: INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE SO_2

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

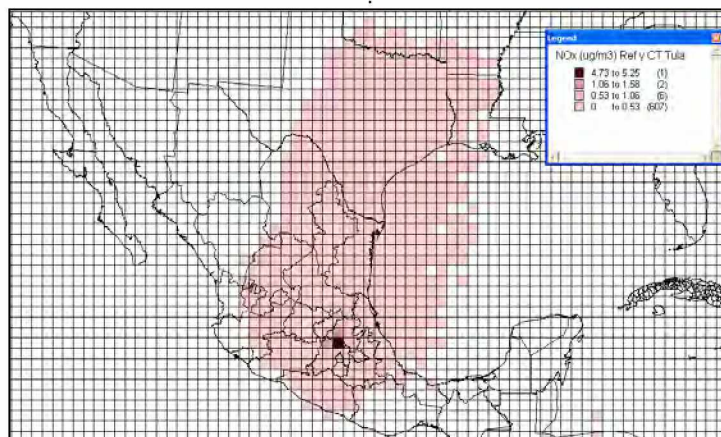


Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo WMI.

Gráfico 9

TULA: INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE NO_x

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



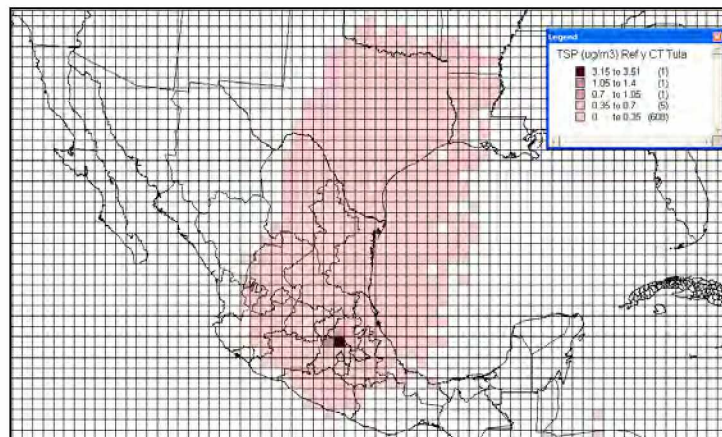
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo WMI.

En el gráfico 11 se observa el resultado de la modelación de la concentración de aerosoles de sulfato. Como se esperaba, se alcanzan incrementos importantes a mayores distancias que en el caso de los contaminantes primarios. El valor máximo alcanzado es de $13,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y se aprecian otros valores elevados en un mayor número de celdas cercanas del dominio, en correspondencia con la fuerte emisión de SO_2 de las fuentes estudiadas y con las emisiones bases de NH_3 , las cuales son altas en la zona.

Gráfico 10

TULA: INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE PST

$(\mu\text{g}/\text{m}^3)$

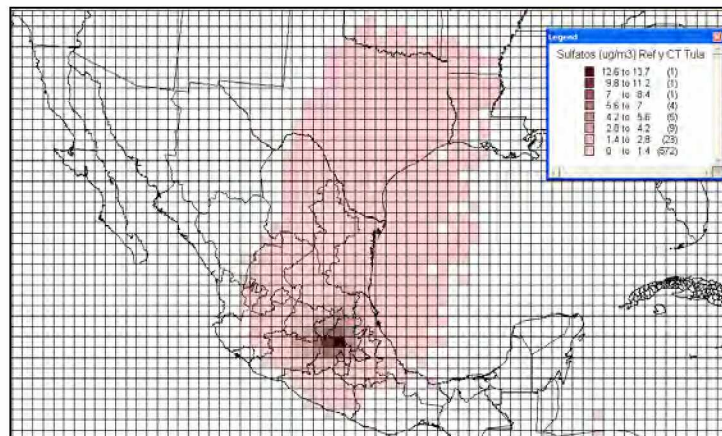


Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo WMI.

Gráfico 11

TULA: INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE SULFATOS

$(\mu\text{g}/\text{m}^3)$



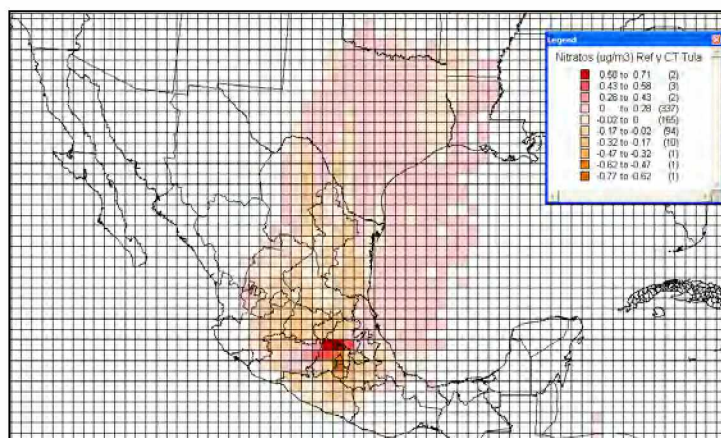
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo WMI.

En el gráfico 12 se expone la variación de la concentración de aerosoles de nitrato. En general se aprecia que los incrementos no son elevados, con un máximo de $0,70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Asimismo, en un número significativo de celdas las concentraciones disminuyen, siendo el decremento máximo de $0,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este comportamiento puede explicarse de la manera siguiente: el SO_2 y el NO_x necesitan del NH_3 para la formación del $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y del NH_4NO_3 , respectivamente. La formación del $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ requiere el doble de NH_3 que la formación de NH_4NO_3 , y ambas reacciones ocurren a la misma velocidad, a iguales concentraciones de los reactantes. Como en general la concentración de NO_x es mucho menor que la de SO_2 , se favorece la formación del $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, e incluso si la emisión de SO_2 de la fuente evaluada es significativamente mayor que la de NO_x , la concentración de nitratos totales ($\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{pNO}_3$) puede disminuir respecto de la concentración obtenida en el caso base. Cabe esperar estos decrementos, especialmente cerca de la fuente donde la influencia de la concentración de SO_2 es aun más importante. En el gráfico 13 se observa el incremento de pNO_3 , especie cuya formación no depende del NH_3 en la mayor parte de las celdas, salvo por un pequeño grupo de celdas alejadas de la fuentes, donde disminuye con un mínimo de apenas $-0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Gráfico 12

TULA: VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



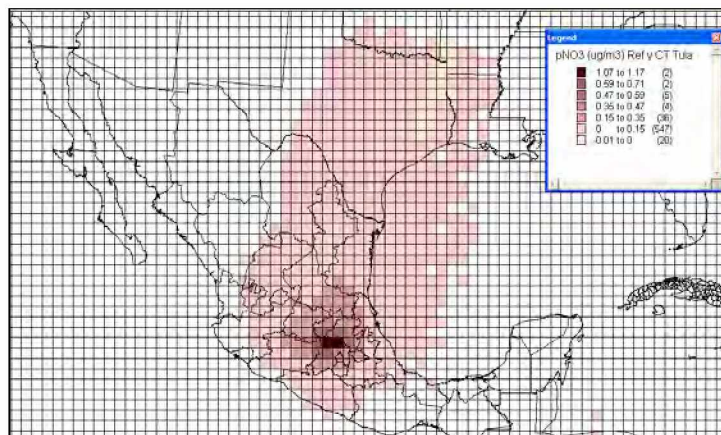
Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo WMI.

3. Deposición

Los análisis realizados con los modelos AERMOD y WMI incluyen la estimación de la deposición seca y húmeda de los contaminantes primarios y secundarios. Estos parámetros son muy importantes por tener una influencia directa en los valores de concentración.

Gráfico 13

TULA: INCREMENTO EN LA CONCENTRACIÓN DE pNO_3
($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo WMI.

Los valores de deposición máximos estimados para el SO_2 tanto en Tula como en Salamanca están en el orden —o superan— de los establecidos en la guía de calidad de aire para Europa. En el dominio local de Tula, los valores promedio también se ubican por encima de lo establecido en dicha guía. Para el caso de NO_x los valores obtenidos de deposición se hallan por debajo de las cargas críticas propuestas para Europa.

No se han analizado estos resultados frente a los valores de carga crítica para las condiciones de México, pues sería necesario caracterizar con gran detalle los datos de uso y tipo de suelos. En general, no se conoce en qué medida los valores de carga crítica propuestos para Europa puedan aplicarse en otras regiones a raíz de que la carga crítica depende del manejo pasado y presente, del tipo de ecosistema y de las condiciones y usos del suelo. La información requerida para analizar adecuadamente los resultados y convertirlos en impactos físicos y costos externos es difícil de obtener.

B. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS EXTERNALIDADES

Siguiendo la Metodología de Vías de Impacto, a partir de los resultados de los modelos de dispersión se calculó el impacto físico en cada uno de los receptores (casos por año). Para la evaluación de los costos externos en la salud se utilizó en casos de morbilidad la suma de los costos directos de la enfermedad, la pérdida de productividad y la Voluntad a Pagar; y en los casos de mortalidad, el valor de los Años de Vida Perdidos por exposición a la contaminación atmosférica.

Las externalidades ambientales de las instalaciones del sector energía en Tula y Salamanca en 2004 se estimaron en 868 millones de dólares y 204 millones de dólares, respectivamente. Este valor corresponde exclusivamente al impacto de la emisión de

contaminantes a la atmósfera en la salud humana, sin considerar los efectos en cultivos agrícolas, ecosistemas, materiales y el calentamiento global. En el cuadro 15 se aprecian los costos externos por zona y por contaminante.

Cuadro 15

COSTOS EXTERNOS POR ZONA Y CONTAMINANTE

(Millones de dólares/año)

Zona	PM ₁₀	SO ₂	Sulfatos	Nitratos	Total costos externos
Tula	74,2	5,5	754,4	34,3	868,4
Salamanca	43,2	2,8	152,3	5,4	203,7

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo SEIA.

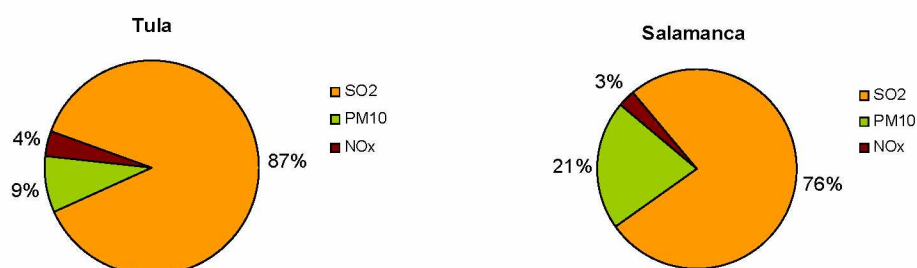
El mayor impacto de las instalaciones en Tula se explica porque tanto las emisiones como la población afectada en el dominio son mayores en esta zona. Como se ha señalado, los resultados deben interpretarse tomando en cuenta el rango de incertidumbre inherente a los modelos, por lo que el valor real puede ser de tres a cinco veces menor o mayor que el estimado.

El contaminante de mayor impacto es el SO₂, como se aprecia en el gráfico 14; su aporte como contaminante primario y como secundario en forma de sulfatos constituye 87% de los costos externos en Tula y 76% en Salamanca. En segundo lugar se encuentran las partículas finas, PM₁₀, que aportan 9% y 21% en Tula y Salamanca, respectivamente. Finalmente, los nitratos tuvieron la menor contribución, por la menor emisión de NO_x, contaminante precursor, y su inferior toxicidad. El impacto de los contaminantes secundarios es más importante que el de los primarios, alrededor de 91% y 77% del total, para Tula y Salamanca, respectivamente.

El impacto local es cercano a 4% para Tula y de 20% para Salamanca. El impacto regional (más allá de los 50 km) es el más elevado, pues los contaminantes son transportados a grandes distancias, se transforman en contaminantes secundarios, y afectan la salud de un número elevado de personas en un área de influencia mayor.

Aun cuando no se rebasen las normas de calidad del aire, el modelo reporta un impacto porque las funciones exposición–respuesta son lineales, sin umbral. El principal componente de los costos es la mortalidad crónica (por material particulado y aerosoles de sulfato y nitrato), que representa más del 60% de los costos externos en ambas zonas. En segundo lugar se cuentan los impactos por morbilidad y pérdida de productividad laboral asociada; en este caso, la contribución por bronquitis crónica y días de actividad restringida son los indicadores más importantes. En el gráfico 15 se muestra la contribución por tipo de impacto al total de las externalidades.

Gráfico 14

CONTRIBUCIÓN POR CONTAMINANTE AL TOTAL DE LAS EXTERNALIDADES

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo SEIA.

Nota: Se considera en el impacto del SO₂, la contribución de los sulfatos, y en el impacto del NO_x, la de los nitratos.

Con objeto de desglosar los costos externos por actividad económica, se corrió el modelo tratando de forma individual las emisiones de la refinación de petróleo y de la generación de electricidad. Se detecta que el modelo estima un menor impacto si las actividades se evalúan de forma separada, debido a los mecanismos de formación de contaminantes en la dispersión regional que consideran distintas emisiones de fondo en cada caso. La suma de los costos de la refinería y de la central eléctrica evaluados de forma independiente es ligeramente inferior al costo de ambas instalaciones evaluadas simultáneamente (alrededor de 4%).

Los impactos de la refinación de petróleo se muestran en el cuadro 16. La externalidad en esta actividad productiva se analizó estableciendo el volumen de proceso de crudo ⁶³ en miles de barriles de petróleo crudo diario (mbd) de las refinerías Miguel Hidalgo (Tula) e Ing. Antonio M. Amor (Salamanca) de PEMEX Refinación. En 2004 las dos refinerías procesaron aproximadamente 490 mbd; 292 mbd en Tula y 199 mbd en Salamanca. Considerando el costo externo de cada instalación, de 418,6 y 114,4 millones de dólares, respectivamente para Tula y Salamanca, se obtiene una externalidad de 3,93 dólares por barril de petróleo crudo para Tula y de 1,58 para Salamanca. Como referencia, si se fija un precio de 33 dólares por barril de petróleo crudo, ⁶⁴ la externalidad representaría 11,9% para Tula y 4,8% para Salamanca.

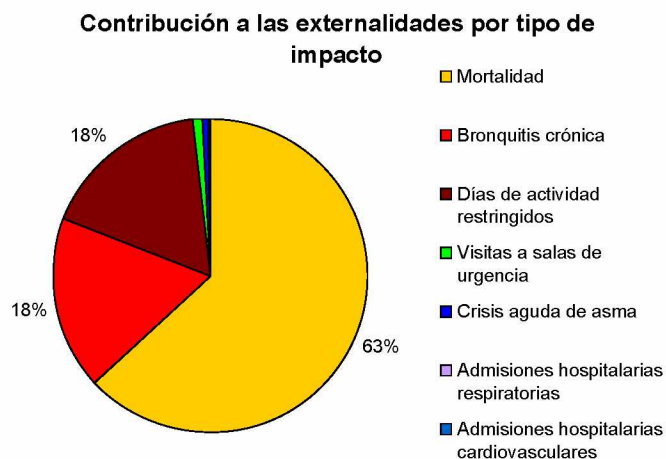
Por su parte, la generación de electricidad durante 2004 en las dos zonas representó externalidades por un valor de 402,5 y 85,9 millones de dólares en Tula y Salamanca, respectivamente. En el cuadro 17 se muestra el total del costo externo para las centrales analizadas, así como el costo por kWh generado. Si se parte de un costo de generación para las centrales termoeléctricas de vapor de 5,8 centavos de dólar por kWh, ⁶⁵ las externalidades representarían 62,6% y 46,6% del costo de generación promedio para las centrales de vapor mayores, respectivamente en Tula y Salamanca.

⁶³ PEMEX (2006).

⁶⁴ Petróleos Mexicanos, "Precio Promedio de Exportación de Petróleo Crudo" (dólares por barril)(www.pemex.com). Valor promedio de 2004.

⁶⁵ CFE (2005a).

Gráfico 15

CONTRIBUCIÓN POR TIPO DE IMPACTO AL TOTAL DE LAS EXTERNALIDADES

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados del modelo SEIA.

Cuadro 16

EXTERNALIDADES DE LA REFINACIÓN DEL PETRÓLEO

Refinería	Total costo externo (millones de dólares ₂₀₀₄)	Dólares/ barril	Proporción del precio (%)
Tula	418,6	3,93	11,9
Salamanca	114,4	1,58	4,8

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo SEIA.

Cuadro 17

EXTERNALIDADES EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

Central	Total costo externo (millones de dólares 2004)	Centavos de dólar/kWh	Proporción del costo de generación (%)
Tula	402,5	3,63	62,6
Salamanca	85,9	2,70	46,6

Fuente: Elaboración propia con base en resultados del modelo SEIA.

La contribución a las externalidades del sector refinación fue de 51% y 57%, en Tula y Salamanca, respectivamente. Sin embargo, es necesario mencionar que los análisis realizados para modelar las emisiones potenciales de los quemadores de campo, cuando las refinerías operan a bajas eficiencias de recuperación de azufre o no operan de manera adecuada las plantas recuperadoras de azufre, muestran que el impacto de las refinerías puede ser considerablemente mayor que el impacto de las termoeléctricas.

Los costos presentados incluyen únicamente el efecto de las emisiones en la salud humana, sin considerar su impacto en materiales, cultivos, ecosistemas o bosques —que generalmente son menores— o en el calentamiento global. Si se considera el impacto por cambio climático, el valor de las externalidades ambientales en las dos zonas se incrementa en 266 millones de dólares, considerando un estimado medio de 18 dólares por tonelada de CO₂ como costo de mitigación en México. El costo por emisiones de GEI se mantiene separado porque se estima por un método indirecto y no por la Metodología de Vías de Impacto.

C. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La mayor contribución a los costos externos la dan los casos de mortalidad, por lo que las variables relacionadas con su evaluación tienen una gran incidencia en los resultados. Por esta razón, se presentan en el cuadro 18 los resultados obtenidos en el caso base y los valores estimados de los costos externos, aplicando el enfoque de Valor Estadístico de la Vida para la mortalidad crónica, usando tanto el valor encontrado para México como el valor transferido del Valor Estadístico de la Vida de otros países, en este caso de Estados Unidos y de la Unión Europea, cifras que se ajustaron mediante la razón entre los PIB respectivos expresados en poder de paridad de compra.

En el primer caso, el resultado aumenta 32% para Tula y 47% para Salamanca. Como se explicó en el capítulo metodológico, existen argumentos para aplicar ambos enfoques; algunos expertos opinan que, en el caso de la mortalidad por contaminación atmosférica, el enfoque de pérdida de expectativa de vida es más adecuado; sin embargo, existen países como Estados Unidos que mantienen el enfoque de valorar cada caso de mortalidad, aplicando el Valor Estadístico de la Vida. El cuadro 18 se presenta únicamente con fines comparativos.

En el segundo caso, al aplicar la transferencia de costos de Estados Unidos y el enfoque de Valor Estadístico de la Vida, el costo externo aumenta por un factor mayor de cinco y seis veces con respecto al caso base, para Tula y Salamanca, respectivamente. Como se señaló, el VEV en México utilizado en este análisis proviene de un único estudio desarrollado mediante el método de compensaciones salariales, por lo que representa un valor bajo con respecto a estudios realizados en países en desarrollo y podría no reflejar la aversión al riesgo de toda la población. En el cuadro 18 se presenta el análisis de sensibilidad, en el que se muestra la conveniencia de desarrollar estudios de valoración contingente sobre la mortalidad, lo que posibilita hacer un comparativo con los principales estudios de referencia internacional. Muestra también que el valor estimado para las externalidades ambientales en el caso base es un valor conservador, ya que utiliza un Valor Estadístico de la Vida estimado a partir del método de compensaciones salariales.

Cuadro 18

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA EVALUACIÓN DE LA MORTALIDAD

(Millones de dólares de 2004)

	Caso base a/	Enfoque de VEV b/	VEV de EUA c/
Tula	868	1 145	4 938
Salamanca	204	300	1 341
Total	1 072	1 445	6 279

Fuente: Elaboración propia. a/ Caso base: valoración de la mortalidad utilizando el enfoque de Años de Vida Perdidos y Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP). Se calculó la pendiente de la FER en Años de Vida Perdidos con estadísticas de México y se estableció el Valor de un Año de Vida Perdido (VAVP) a partir del VEV estimado por Hammit-Ibarrarán; b/ Enfoque de Valor Estadístico de la Vida: valoración de la mortalidad utilizando el enfoque de casos de muerte evitados y el Valor Estadístico de la Vida estimado por Hammit-Ibarrarán; c/ Igual que b), utilizando el VEV transferido de Estados Unidos (considerando la Paridad del Poder Adquisitivo y una elasticidad ingreso igual a 1).

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio estima, mediante la aplicación de la Metodología Vías de Impacto, los costos externos del sector energía en las zonas críticas de Tula, Hidalgo, y Salamanca, Guanajuato, en donde se encuentran instalaciones de refinación de petróleo y centrales termoeléctricas.

Las externalidades ambientales negativas del sector energía, para el año 2004, se estimaron en 868 millones y 204 millones de dólares en las zonas de Tula y Salamanca, respectivamente. El impacto más fuerte de las instalaciones en Tula se explica porque tanto las emisiones como la población afectada son mayores en esta zona.

Los costos presentados incluyen únicamente el efecto de las emisiones en la salud humana sin contemplar su impacto en materiales, cultivos, ecosistemas, o en el calentamiento global. Si se abarca el impacto por cambio climático, las externalidades ambientales se incrementan en 266 millones de dólares, según el estimado medio de costos de mitigación en México de una tonelada de CO₂.

El contaminante de mayor impacto es el SO₂; su aporte, como contaminante primario y secundario en forma de sulfatos, constituye 87% de los costos externos en Tula y 76% en Salamanca. El impacto regional (más allá de los 50 km) es mayor, pues los contaminantes son transportados a grandes distancias y afectan la salud de un número elevado de personas en un área de influencia mayor.

Considerando el costo externo de cada refinería, de 418,6 millones y 114,4 millones de dólares, respectivamente, se obtiene una externalidad de 3,93 dólares por barril de petróleo crudo procesado para Tula y de 1,58 dólares para Salamanca. Como referencia, si se considera un precio internacional de 33 dólares por barril de petróleo crudo, la externalidad representaría 11,9% y 4,8%, respectivamente, para Tula y Salamanca.

Para la generación de electricidad en las dos zonas durante el año 2004, se estimó un costo externo de 402,5 millones y 85,9 millones de dólares para Tula y Salamanca, respectivamente. La externalidad equivale a 3,63 y 2,70 centavos de dólar por kWh generado, para Tula y Salamanca; si se considera un valor de referencia de 5,8 centavos de dólar por kWh, como costo de producción en las centrales termoeléctricas de vapor, los costos por externalidades representarían 62,6% y 46,6% del costo de generación, respectivamente. Estos resultados son consistentes con la estimación de externalidades de la generación de electricidad en el principal estudio de referencia de Europa, el Proyecto ExternE.

Los resultados deben interpretarse tomando en cuenta el rango de incertidumbre considerado en el modelo, lo que implica que el valor real podría ser de tres a cinco veces menor o mayor que el estimado.

A pesar de las incertidumbres inherentes a este tipo de análisis, en el presente estudio se realizaron avances metodológicos que permitieron una mejor simulación de fuentes fijas de

emisión. Los modelos de dispersión utilizados proporcionaron información más detallada que la del estudio previo sobre los niveles de concentración de contaminantes, tanto en el dominio local como regional. Los promedios anuales de concentración estimados de PM_{10} y NO_x se ubican en lo general dentro de los límites fijados por las normas oficiales mexicanas de la Secretaría de Salud, vigentes a la fecha. Sin embargo, para el caso del SO_2 , en ambas zonas se encuentran fuera de los límites causando incidencias importantes a la salud.

La concentración estimada de SO_2 excede el valor normado en el aire ambiente que establece la NOM-022-SSA1-1993, como medida de protección a la salud de la población. La concentración promedio anual supera el valor de referencia $79 \mu g/m^3$ en un área de $784 km^2$ en el caso de Tula y de $424 km^2$ en Salamanca, y es mayor del doble en un área importante en ambas zonas. En algunos puntos del dominio local en Tula los valores estimados de concentración promedio anual sobrepasan en más de 10 veces la norma. El parámetro de concentración máxima promedio de 24 horas ($340 \mu g/m^3$) se rebasa también varios días en ciertos receptores.

Los modelos de dispersión utilizados requieren ser calibrados y verificados en campo, utilizando mediciones de estaciones de monitoreo de la calidad del aire. En Salamanca, por ejemplo, la red de monitoreo local confirma que en una de las estaciones se excedió la norma de concentración promedio anual para el 2004. En Tula, es necesario recopilar información sistematizada de la calidad del aire.

Los resultados obtenidos, tanto del costo en salud como de los valores estimados de concentración de contaminantes superiores a los permitidos, ratifican la necesidad de realizar acciones para controlar las emisiones. Los primeros resultados indujeron a la SEMARNAT a expedir una Norma Oficial Mexicana de Emergencia (NOM-EM-148), en abril de 2006, para reducir las emisiones de SO_2 de las refinerías de Tula y Salamanca, mediante el proceso de recuperación de azufre. Esta norma está en proceso de expedirse como norma definitiva, extendiendo su campo de aplicación a todo el Sistema Nacional de Refinación.

Por lo que hace a las emisiones de los procesos de combustión del sector eléctrico, su reducción requiere de acciones firmes del sector energía para incluir el uso de tecnologías de control de emisiones, en los casos en que no se pueda disponer de combustibles limpios. El presente estudio ratifica que los beneficios ambientales que se obtendrían de la reducción de emisiones son contundentes.

Sin duda alguna, la producción de energía es factor esencial del desarrollo y genera también externalidades positivas; su producción y consumo son indispensables para el crecimiento de México. Se espera que el estudio proporcione las bases para inducir a los agentes económicos a reorientar sus procesos y tecnologías a la protección del ambiente y al desarrollo sustentable, considerando los costos del impacto ambiental que ocasionan.

ACRÓNIMOS

AERMOD	American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model
AVP	Años de Vida Perdidos
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe de la Organización de Naciones Unidas.
CFE	Comisión Federal de Electricidad
EPA	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)
FUND	Climate Framework for Uncertainly Negotiation and Distribution
GPCC	Global Precipitation Climatology Center
IMSS	Instituto Mexicano del Seguro Social
INE	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
INSP	Instituto Nacional de Salud Pública
IRR	Incremento de Riesgo Relativo
ISCST3	Industrial Source Complex Short-Term 3 (Modelo de dispersión a escala local para instalaciones industriales)
LFC	Luz y Fuerza del Centro
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PPP	Paridad del Poder Adquisitivo
SEIA	Sistema de Evaluación del Impacto Ambiental de Instalaciones Energéticas
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
SIG	Sistema de información geográfica
SIMPACTS	Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation (Modelo simplificado para estimar el Impacto de la Generación de Electricidad)
SINAIS	Sistema Nacional de Información en Salud
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
UWM	Uniform World Model (Modelo simplificado para estimar externalidades)
VAVP	Valor de un Año de Vida Perdido
VEV	Valor Estadístico de la Vida
WTM	Windrose Trajectory Model (Modelo de dispersión de contaminantes a escala regional)

BIBLIOGRAFÍA

Banco Mundial (2006), *World Development Indicators Database*.

Beth, Anne y Brad Bass (2005), “Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE Model”, 6th Biennial CANSEE (Canadian Society for Ecological Economics), conferencia, Toronto, 27 a 29 de octubre.

Boerboom, A. J. H. y G. Kleyn (1969), “Diffusion coefficients of noble gases in water”, *J. Chem. Phys.*, vol. 50, pp. 1086-1088.

Carmichael, G. R. y otros (2001), “Model intercomparison study of long range transport and sulfur deposition in East Asia (MICSASIA)”, *Water Air & Soil Pollution*.

César, H. y otros (2002), *Improving Air Quality in Metropolitan Mexico City Economic Valuation*, Banco Mundial, Working Paper 2785.

CFE (Comisión Federal de Electricidad) (2005a), *Costos y parámetros de referencia para la formulación de proyectos de inversión del sector eléctrico*, México.

_____ (2005b), *Informe de operación 2004*, México.

Cimorelli, A. y otros (2005), “AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part I: General model formulation and boundary layer characterization”, *Journal of Applied Meteorology*, 44(5): 682–693.

Derwent, R. G. y otros (1989), “An intercomparison of long-term atmospheric transport models: the budgets of acidifying species for the Netherlands”, *Atmospheric Environment*, vol. 23, N° 9, pp. 1893-1909.

Derwent, R. G. y K. Nodop (1986), “Long-range transport and deposition of acidic nitrogen species in north-west Europe”, *Nature*, vol. 324, noviembre, pp. 356-358.

European Commission, ExternE (2005), *Externalities of Energy: Methodology 2005 Update* (EUR 21951), Directorate-General XII, Science Research and Development, Office for Official Publications of the European Communities, L-2920, Luxembourg, F75272, París, Cedex 06, Francia, pp. 83-85 y 181-188.

Hammit, J. y M. Ibararán (2006), *The Economic Value of Fatal and Non-Fatal Occupational Risks in Mexico City Using Actuarial - and Perceived - Risk Estimates*, México.

IAEA (International Atomic Energy Agency (2002), *AIRPACTS equations for impact and damage cost assessments*. Addendum to the AirPacts manual.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2006), *Población total por grupos quinquenales de edad según sexo, 1950 a 2005*, México.
- ____ (2005), *Salario mínimo general promedio de los Estados Unidos Mexicanos*, Comisión Nacional de Salarios Mínimos y Distribución porcentual de los hogares por sexo del jefe y rangos de salarios mínimos equivalentes, 1992 a 2004, México.
- ____ (2003a), *Continuo de elevaciones mexicano (CEM) escala 1:50,000*, México.
- ____ (2003b), *Uso del suelo y vegetación, Serie 3*, México.
- ____ (2000), *Marco geoestadístico municipal 2000*, México.
- INEGI/Secretaría de Salud (2005), *Base de datos de defunciones 2004*.
- Leksell y Rabl (2001), “Air pollution and mortality: Quantification and valuation of years of life lost”, *Risk Analysis*, vol. 1, N° 5.
- Logan, J. A. (1999), “An analysis of ozones onde data for the troposphere: Recommendations for testing 3-D models and development of a gridded climatology for tropospheric ozone”, *Journal of Geophysical Research - Atmospheres* 104(D13): 16115-16149.
- McKinley, G. y otros (2003), *The Local Benefits of Global Air Pollution Control in Mexico City*, Instituto Nacional de Ecología, México [en línea] (www.ine.gob.mx).
- Metcalf, S. E. y otros (1989), “Acid deposition modeling and the interpretation of the United Kingdom secondary precipitation network data”, *Atmospheric Environment*, vol. 23, N° 9, pp. 2033-2052
- OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) (2003), *SIMPACTS: Simplified Approach for Estimating Impacts of Electricity Generation*, Multilanguage version.
- ____ (2002a), *AIRPACTS equations for impact and damage cost assessments*, Addendum to the AirPacts manual.
- ____ (2002b), *AIRPACTS Manual, (Version 1.0), A tool for assessing the environmental impacts and damage costs to human health, agricultural crops and man-made structures from exposure to routine atmospheric emissions*.
- OMS (Organización Mundial de la Salud) (2000), “Air quality guidelines for Europe”, Regional Office for Europe, Copenague, WHO Regional Publications, *European Series, N° 91*, segunda edición.
- Paine, R. J. y otros (1998), “Evaluation Results for AERMOD”, *Draft Report, Docket N° A-99-05, II-A- 05* [en línea] (www.epa.gov./scram001/).

Patronato para el Monitoreo de la Calidad del Aire de Salamanca, A. C. (2004), “Datos de calidad del aire y parámetros meteorológicos de las estaciones de la red”, México (Disco de datos enviado a SEMARNAT).

PEMEX (Petróleos Mexicanos) (2006), *Anuario estadístico 2005*, México.

_____ (2005a), *Informe 2004, desarrollo sustentable*, México.

_____ (2005b), *Anuario estadístico 2004*, México.

PEMEX Refinación (2006), “Reporte en línea de emisiones contaminantes al aire”, SISPA, México.

Perry, S. y otros (2005), “AERMOD: A dispersion model for industrial source applications. Part II: Model performance against 17 field study databases”, *Journal of Applied Meteorology*, 44(5), pp. 694–708.

Rabl A. y J. V. Spadaro (1999), *An Analysis of the Uncertainties of Damages and Costs of Air Pollution*, Centre d’Energétique, École des Mines, París, Francia.

Sahr, Robert C. (2006), *Consumer Price Index (CPI), Conversion Factors 1800 to estimated 2016 to Convert to Dollars of 2000*, Oregon State University.

Sander, Rolf (1999), *Compilation of Henry’s Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry*, Air Chemistry Department, Max-Planck Institute of Chemistry [en línea] (<http://www.mpch-mainz.mpg.de/sander/res/henry.html>), febrero.

Scire, J. S., D. G. Strimaitis y R. J. Yamartino (2000), *A User’s Guide for the CALPUFF Dispersion Model* (Version 5.0), Earth Tech, Inc., Concord, MA.

SENER (Secretaría de Energía) (2005a), *Emisiones sector eléctrico por central 2004* [en línea] (www.sener.gob.mx), México.

_____ (2005b), *Generación bruta de energía eléctrica*, [en línea] (www.sener.gob.mx), México.

_____ (2004), *Emisiones del sector eléctrico nacional* [en línea] (www.sener.gob.mx), México.

_____ (s/f), *Elaboración de productos petrolíferos por refinería*, Sistema de Información Energética con información de Petróleos Mexicanos, período 1 de enero a 31 de diciembre de 2004 [en línea] (www.sener.gob.mx), México.

Secretaría de Salud/Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS) (2005a), *Sistemas automatizados de egresos hospitalarios*, México.

_____ (2005b), *Mortalidad 2004*, México.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2006a), *Hacia una estrategia nacional de acción climática*, México.

_____ (2006b), *Inventario nacional de emisiones*, México.

_____ (2005), *Cédulas de operación anual del 2004 de las refinerías de petróleo y centrales eléctricas*, México.

SEMARNAT/CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2004), *Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México* (LC/MEX/L. 644), México, 22 de noviembre.

Servicio Meteorológico Nacional (2005a), *Datos de la red de radiosondeos. Estación 76679*, datos del 2004, México.

_____ (2005b), *Datos meteorológicos de las estaciones meteorológicas automáticas con transmisión vía satélite, Estaciones 2389, 2320, 2350, 1915, 2080, 2423 y 2364*, datos del 2004, México.

_____ (2005c), *Datos de estaciones climatológicas, datos del 2004, Archivo comprimido en relación a la solicitud de información climatológica de datos diarios representativos para Tula, Hidalgo y Salamanca, Guanajuato*, México.

Spadaro, Joseph V. (2006), "Methodology for CRF and VOLY estimates for Mexico", comunicación personal por correo electrónico, 11 de septiembre.

_____ (1999), *Quantifying the Impacts of Air Pollution*, Centre d'Energétique, École de Mines, París.

Spivakovsky, C. M. y otros (2000), "Three-dimensional climatological distribution of tropospheric OH: update and evaluation", *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 105(D7): 8931-8980.

Spix, C. y otros (1998), *Short Term Effects of Air Pollution on Hospital Admissions for Respiratory Diseases in Europe: a Quantitative Summary of APHEA Study Results*, Archives of Environmental Health.

Stieb, D. M., S. Judek y R. T. Burnett (2002), *Meta-analysis of Time-Series Studies of Air Pollution and Mortality: Effects of Gases and Particles and the Influence of Cause of Death, Age, and Season*, Air Waste Management Association.

Trukenmüller, A., C. Klamt y W. Krewitt (2001), *Revision of WTM Parameters for EcoSense China*, Stuttgart, Stuttgart University, IER.

Trukenmüller, A. y R. Friedrich (1995), *Die Abbildung der großräumigen Verteilung, chemischen Umwandlung und Deposition von Luftschadstoffen mit dem Trajektorienmodell WTM*, in *Jahresbericht ALS 1995*, Stuttgart, p. 93-108.

USEPA (United States Environmental Protection Agency) (2005), 40 CFR Part 51 [AH-FRL-7990-9] RIN 2060-AK60, “Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions”, Federal Register, vol. 70, N° 216, Rules and Regulations, 9 de noviembre.

_____ (2004a), “User’s Guide for the AERMOD Meteorological Preprocessor (AERMET)”, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711, 03-002, noviembre.

_____ (2004b), 454/B-03-001 “User's Guide For The AMS/EPA Regulatory Model – AERMOD”, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711, septiembre.

_____ (2004c), “User's Guide for the AERMOD Terrain Preprocessor (AERMAP)”, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711.

_____ (2002), “Compendium of reports from the Peer Review Process for AERMOD” [en línea] (www.epa.gov/scram001), febrero.

_____ (1998), “User's Guide for the AERMOD Terrain Preprocessor (AERMAP)”, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina 27711.

_____ (s/f), *The Benefits and Costs of the Clean Air Act 1990 to 2010*.